

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O CONTROLE DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**

**Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME LOCATELLI

Florianópolis, Setembro de 2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O CONTROLE DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**

GUILHERME LOCATELLI

Esta dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng. – Orientador

Eng. Raul Gohr Junior, Dr. – Coorientador

Prof. Fernando Cabral, Ph.D.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng

Prof. Américo Scotti, Ph.D.

Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.

Aos meus pais, Ronaldo e Ilani.

Ao meu irmão Vinícius

À todas as pessoas que participaram da minha vida nestes anos de

Engenharia

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jair Carlos Dutra pela orientação e pela dedicação dentro e fora do LABSOLDA.

Ao Engenheiro Raul Gohr Júnior, que além de co-orientador, é um grande exemplo de amizade e companheirismo, e o principal responsável pela minha decisão em realizar o mestrado.

Ao Eng. Regis H.G e Silva, Moisés Alves de Oliveira, Carlos I. Baixo, Túlio F. dos Santos e ao Fis. Tiago Viera da Cunha pela colaboração em diversos aspectos do trabalho.

À equipe do LABSOLDA, em especial à Márcia Paula Thiel, Marcelo P. Okuyama, Alexandre Furstenberger, Jader G. da Silveira.

Ao CNPQ, pela bolsa de pesquisa e compra de materiais.

À empresa IMC-Soldagem por parte do financiamento e apoio a este trabalho.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela minha aceitação e tão conceituada instituição

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS.....	16
1.1	Justificativas	16
1.2	Objetivos.....	19
2	HISTÓRICO E ANTECEDENTES DO TRABALHO.....	21
2.1	Histórico dos sistemas de controle e monitoramento de processos desenvolvidos no LABSOLDA	21
2.1.1	Primeiras Plataformas de Controle e Aquisição de Sinais.....	22
2.2	Nova estruturação das plataformas de controle de processos e aquisições de sinais.....	28
2.3	Implementação de softwares mais complexos de controle de variáveis dos processos	32
2.4	Nova geração de softwares de controle e aquisição de dados do LABSOLDA.....	36
3	ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA AVANÇADO DE CONTROLE.....	40
3.1	Introdução.....	40
3.2	Disposição do Sistema Avançado de Controle.....	42
3.3	Estruturação da Interface com o Usuário (CPU 1).....	44
3.3.1	Diagrama de classes	46
3.3.1.1	Particularidades do Borland C++ Builder.....	49
3.3.2	Desenho de forma de onda qualquer	53
3.4	Protocolo de Comunicação entre as CPU's.....	58
3.5	Estruturação do Sistema de Controle e Aquisição (CPU 2).....	60
3.5.1	Estruturação do software SACOSCR	62
3.5.2	Programa Principal	65
3.5.3	Interrupções do SACOSCR	67
3.5.3.1	Interrupção de Alta Frequência (10kHz)	68

3.5.3.2	Interrupção de baixa frequência (18,2 Hz).....	69
3.5.3.3	Interrupção externa (Comunicação serial).....	70
3.5.4	Placa de aquisição de sinais e controle Interdata v 3.0	71
3.6	Fonte de Soldagem (Entradas Analógicas, Adaptações)	72
3.7	Adaptações das entradas analógicas no comando remoto	74
3.8	Adaptação do Cabeçote alimentador de arame	77
3.9	Melhoramentos no circuito de reignição de arco da Inversal 450	80
4	APLICAÇÕES DO SISTEMA AVANÇADO DE CONTROLE	85
4.1	Introdução.....	85
4.2	Novas técnicas de estabilização do processo MIG/MAG	86
4.3	Novo método de abertura de arco	88
4.3.1	Etapas do procedimento de abertura de arco.....	93
4.3.1.1	Etapas de aproximação do arame-eletrodo.....	94
4.3.1.2	Deteção do curto circuito	95
4.3.1.3	Etapas de estabilização.....	99
4.4	Novo método de Controle de Comprimento de Arco	102
4.4.1	Procedimento de Controle de Comprimento de Arco	106
4.4.1.1	Leitura do Comprimento do arco	108
4.4.1.2	Obtenção do sinal de erro	115
4.4.1.3	Controladores	117
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	129
5.1	Resultados do Sistema Avançado de Controle	129
5.1.1	Interface do processo MIG/MAG no SAC	129
5.1.1.1	MIG/MAG Pulsado.....	130
5.1.1.2	MIG/MAG Pulsado Sinérgico	132
5.1.1.3	MIG/MAG Convencional	133
5.1.1.4	MIG/MAG Forma de Onda qualquer.....	134
5.1.2	Interface do processo CCC no SAC	136
5.2	Características Especiais do SAC	138
5.2.1	Geração indireta de formas de onda especiais	138

5.2.2	Interface do SAC para o novo método de abertura de arco	140
5.2.3	Interface do SAC para o controle de comprimento de arco	142
5.3	Resultados das novas técnicas de estabilização de arco.....	144
5.3.1	Resultados do novo método de abertura de arco	144
5.3.1.1	Análise do novo método de abertura de arco	146
5.3.2	Resultados do método de controle de comprimento de arco.....	148
5.3.2.1	Análise do método de controle de comprimento de arco.....	150
6	CONCLUSÕES	154
6.1	Consolidação da plataforma de Controle e Aquisição	154
6.2	Infra-estrutura para pesquisas sobre a abertura suave do arco	154
6.3	Novos métodos de controle de comprimento de arco.....	155
6.4	Estudos relacionados à soldagem TIG CA	155
6.5	Plataforma para o Processo Curto-Circuito Controlado.....	156
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	157
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Foto da IMAC	23
Figura 2.2 - Fonte de soldagem ELMA C400P	24
Figura 2.3 - Primeira versão da <i>Interdata</i>	25
Figura 2.4 – Interface do software <i>Oscilos2</i>	26
Figura 2.5 – Interface do software <i>MIG/MAG</i>	26
Figura 2.6 - Dispositivos de instrumentação (TC-1, MVA e MVG)	27
Figura 2.7 - Fonte de soldagem Inversal.....	29
Figura 2.8 - Interface do software <i>MIGTERM</i>	31
Figura 2.9 – Fonte de soldagem <i>MTE Digitec</i> em operação	32
Figura 2.10 - Interface do software <i>Plasma-PUL</i>	34
Figura 2.11 - Interface do software <i>Digi2000</i>	36
Figura 2.12 – Primeira Interface do Sistema Avançado de Controle.....	38
Figura 3.1 – Disposição Conceitual do Sistema Avançado de Controle.....	42
Figura 3.2 - Disposição física do Sistema Avançado de Controle.....	43
Figura 3.3 - Estrutura de classes do SAC (CPU 1)	46
Figura 3.4 - Protótipo da classe <i>Tvariaveis</i>	47
Figura 3.5 - Protótipo da classe <i>TMIG_Pulsado</i>	47
Figura 3.6 - Construtor da classe <i>MIG_Convencional</i>	48
Figura 3.7- Área de trabalho do <i>Borland C++ Builder</i>	50
Figura 3.8 – Script principal do SAC (CPU 1).....	51
Figura 3.9 – Métodos da classe <i>TInterface</i>	52
Figura 3.10 - <i>FastCall's</i> direcionando o fluxo de dados para <i>TInterface</i>	53
Figura 3.11 – Interface para o desenho de formas de onda no processo MIG/MAG	54
Figura 3.12 – Desenho de forma de onda no processo MIG/MAG.....	55
Figura 3.13 – Trecho do código de conversão dos pontos do desenho	56
Figura 3.14 – Obtenção dos vetores de dados.....	57
Figura 3.15 – Trecho do código de geração de vetores	57
Figura 3.16 – Protocolo de comunicação serial utilizado pelo SAC	59
Figura 3.17 - Gerenciamento de interrupções do SAC (CPU2).....	63
Figura 3.18 – Laço principal de execução do software <i>SACOSCR</i>	65

Figura 3.19 – Classe <i>Controle</i> do software <i>SACOSCR</i>	66
Figura 3.20 – Trecho do código da classe <i>MIGPN</i>	69
Figura 3.21 – Interrupção de baixa frequência na classe <i>MIGPN</i>	70
Figura 3.22 – Rotina de armazenamento das variáveis da classe <i>MCVT</i>	71
Figura 3.23 – Placa de aquisição e controle Interdata v3.0.....	72
Figura 3.24 – Painel frontal da Inversal 450.....	73
Figura 3.25 - Lógica de funcionamento da Inversal 450.....	75
Figura 3.26 – Adaptação do conector de comando remoto do SAC	76
Figura 3.27 – Esquemático de adaptação do cabeçote <i>STA-20</i>	79
Figura 3.28 – Circuito de acionamento do sentido de tração dos motores.....	79
Figura 3.29 – Circuito de Pulso	81
Figura 3.30 - Esquemático do circuito de pulso.....	83
Figura 4.1 – Comparativo do processo MIG/MAG.....	87
Figura 4.2 – Abertura de arco no processo MIG/MAG <i>convencional</i>	89
Figura 4.3 – Oscilogramas de abertura do arco no processo MIG/MAG <i>convencional</i>	90
Figura 4.4 – Oscilogramas de abertura de arco no processo MIG/MAG por <i>comando de corrente</i>	91
Figura 4.5 - Etapas do procedimento de abertura suave de arco.....	93
Figura 4.6 – Etapa de aproximação do arame-eletrodo	95
Figura 4.7 - Etapa de detecção do curto-circuito.....	96
Figura 4.8 - Etapa de retorno do arame-eletrodo	98
Figura 4.9 – Faixas de tensão interpretadas pelo software de controle	99
Figura 4.10 – Problemas com a pequena distância entre arame-eletrodo e metal de base após o surgimento da centelha.....	100
Figura 4.11 – Etapa de estabilização do arco voltaico	101
Figura 4.12 – Fluxograma do procedimento de abertura suave do arco	102
Figura 4.13 – Comparação entre aço e alumínio no processo MIG/MAG	103
Figura 4.14 – Nomenclatura utilizada na soldagem MIG/MAG.....	104
Figura 4.15 – Estrutura clássica de controle	106
Figura 4.16 – Estrutura clássica de controle adaptada ao processo MIG/MAG pulsado.....	107
Figura 4.17 – Variação da tensão para o mesmo comprimento de arco	109

Figura 4.18 – Variação do comprimento de arco de acordo com a pulsação de corrente durante o regime permanente	110
Figura 4.19 - Diferença de numero de pontos catódicos entre base e pulso .	111
Figura 4.20 – Oscilogramas do processo MIG/MAG pulsado.....	112
Figura 4.21 – Efeitos pulsação da corrente sobre a tensão de arco	114
Figura 4.22 – Aquisição da tensão de arco durante o tempo de base	115
Figura 4.23 – Oscilogramas estáveis do processo MIG/MAG pulsado	117
Figura 4.24 – Relação linear entre corrente de base e corrente média.....	120
Figura 4.25 – Algoritmo do Controlador PID para a corrente de base.....	121
Figura 4.26 – Ações de controle positivas e negativas (corrente de base)	122
Figura 4.27 - Relação não-linear entre tempo de base e corrente média	123
Figura 4.28 – Ações de controle positivas e negativas (tempo de base)	124
Figura 4.29 - Algoritmo do Controlador PID para o tempo de base.....	125
Figura 4.30 – Ações de controle positivas e negativas (velocidade de arame-eletrodo)	127
Figura 4.31 - Algoritmo do Controlador PID para a velocidade de arame-eletrodo	128
Figura 5.1 – Interface do Sistema Avançado de Controle em sua plataforma Ms-Windows.....	130
Figura 5.2 – Interface do processo <i>MIG/MAG Pulsado Normal</i>	131
Figura 5.3 – Interface a do processo <i>MIG/MAG Pulsado Sinérgico</i>	132
Figura 5.4 – Interface do processo <i>MIG/MAG Convencional</i>	133
Figura 5.5 – Interface do processo <i>MIG/MAG Onda Qualquer</i>	134
Figura 5.6 – Aplicação da interface <i>MIG/MAG Onda Qualquer</i>	136
Figura 5.7 – Interface do processo <i>CCC</i> no SAC.....	137
Figura 5.8 – Formas de onda geradas pelo <i>SAC Turbo</i>	139
Figura 5.9 – Formas de onda suavizadas geradas pelo <i>SAC Turbo</i>	140
Figura 5.10 – Cabeçalho de controle de abertura do SACOSCR.....	141
Figura 5.11 – Interface com o usuário do SACOSCR	143
Figura 5.12 – Oscilogramas obtidos nos ensaios de abertura de arco.....	147
Figura 5.13 - Oscilogramas dos ensaios <i>C5510</i> e <i>C5511</i>	148
Figura 5.14 – Oscilogramas da realimentação pela corrente de base	151
Figura 5.15 – Oscilogramas da realimentação pelo tempo de base.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Tabela de experimentos para o procedimento de abertura.....	146
Tabela 5.2 - Constantes obtidas para os controladores PID	150

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

E.C.: Esforço de Controle

I_b : Corrente de base

IMAC: Interface Modular de Aquisição e Controle

I_{pos} : Corrente de pos-toque

ISA: Industry Standard Architecture

K_p : constante referente a parcela proporcional de um controlador PID

K_i : constante referente a parcela integral de um controlador PID

K_{d1}: constante referente a parcela derivativa de um controlador PID

K_{d2} : constante referente a parcela derivativa de um controlador PID

LABMETRO: Laboratório de Metrologia

LABSOLDA: Laboratório de Soldagem

LAMAN: Laboratório de Manutenção

PC: Personal Computer

SAC : Sistema Avançado de Controle

STA-20: Cabeçote de alimentação de arame-eletrodo

t_b: Tempo de base

Testab : Tempo de estabilização

U_{inicial}: Tensão inicial de regime permanente

U_{ref}: Tensão de referência

V_a: Velocidade de alimentação de arame-eletrodo

V_{aprox} : Velocidade de arame-eletrodo de aproximação

V_{aret} : Velocidade de arame-eletrodo de retorno

Z-80 : microprocessador

RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se uma plataforma de controle e monitoramento de processos de soldagem a arco, proporcionando às diferentes linhas de pesquisa do LABSOLDA, uma ferramenta versátil e eficiente para o estudo didático e científico da tecnologia da soldagem. Criou-se o Sistema Avançado de Controle (SAC) a partir de unidades microprocesadas (CPU's) que comandam, por meio de sinais analógicos e digitais, uma fonte de soldagem também desenvolvida no LABSOLDA, e especialmente adaptada para dar suporte ao desenvolvimento da plataforma em questão. O trabalho divide-se em duas partes, a estruturação e desenvolvimento propriamente dito do SAC, e um estudo sobre inovações no controle do processo de soldagem MIG/MAG pulsado. A parte de estruturação do sistema conta com todo o desenvolvimento da interface com o operador e das lógicas de controle necessárias para o perfeito funcionamento dos diferentes processos de soldagem que a plataforma está apta à gerenciar. As inovações propostas para o controle do processo MIG/MAG pulsado, assunto da segunda parte do trabalho, tem seu foco direcionado no sentido de atestar sobre as funcionalidades do Sistema Avançado de Controle, tais como o dinamismo na pesquisa e a velocidade na implementação de novas estruturas de controle. Esta segunda parte também contém alguns dos resultados obtidos no estudo do processo MIG/MAG, como novas técnicas de abertura de arco e diferentes métodos de controle do comprimento do mesmo durante o cordão. O SAC, com a conclusão deste trabalho, já se apresenta como uma ferramenta útil, didática e de pronta utilização, tanto por parte da equipe do LABSOLDA,

quanto por outras instituições de ensino e pesquisa de tecnologia da soldagem, podendo, devido à estruturação utilizada, se manter em contínuo desenvolvimento, se adaptando à diferentes necessidades e as inovações tecnológicas de mercado.

ABSTRACT

A control and monitoring platform of welding arc processes was developed in this work. It provided the LABSOLDA's different lines of research, a versatile and efficient tool for the didactic and scientific study of the welding technology. The Advanced Control System (SAC) was created with microprocessors (CPU' s) that drives, through analogical and digital signals, a welding power source also developed at LABSOLDA. It was especially adapted to give support to the platform development. The work was splitted in two parts: the SAC structuring and development, and a study of innovations in the control of MIG/MAG pulsed welding process. In the first part a user interface and the control logics for the perfect different welding processes functioning were developed. The innovations proposed for the MIG/MAG pulsed process control, developed in second part, was addressed to certify for the Advanced Control System functionalities, such as the research dynamism and the implementation speed of the new control structures. This second part also contains some of the results obtained about the MIG/MAG process study, as new techniques of arc striking and different arc length control methods. At the end of this work the SAC was proved to be a useful, didactic and ready to use tool, by the LABSOLDA team, and others education and research welding technology institutions, being able, due structuring used, to keep in continuous development, being adjusted for the different necessities and the technological market innovations.

CAPITULO 1

JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

1.1 Justificativas

Os diversos avanços tecnológicos no campo da soldagem a arco justificam o fato desta ter se transformado, na última década, em um dos mais importantes processos de fabricação aplicados na indústria. Pesquisas científicas realizadas nesta área buscam trazer inovações que atinjam diretamente a produtividade e a qualidade das diferentes modalidades de soldagem.

O estudo científico da tecnologia da soldagem está fundamentalmente atrelado à infra-estrutura disponível e ao potencial tecnológico da mesma. Isto significa que, para a compreensão dos fenômenos que cercam esta ciência é preciso contar com equipamentos capazes de avaliar com clareza o comportamento dos diferentes processos de soldagem, bem como ter a possibilidade de intervenções controladas no funcionamento dos mesmos.

No entanto, o mercado de equipamentos voltados à tecnologia de soldagem é, como esperado, totalmente voltado à indústria, onde encontra seus maiores consumidores, dificultando estudos científicos que necessitam de flexibilidades e adaptações nem sempre disponíveis em equipamentos comerciais. Devido principalmente a utilização em linhas de produção ou em centrais de manutenção, os equipamentos de soldagens disponíveis para uso industrial possuem painéis de comando bastante simples, onde constam

apenas opções de intervenção extremamente necessárias. Este tipo de equipamento não permite uma avaliação conclusiva sobre qualquer parâmetro de soldagem que se deseja estudar, e muito menos permite a intervenção sobre qualquer aspecto de seu funcionamento.

Ficar restrito a conceitos pré-estabelecidos por fabricantes não convém a nenhuma instituição de pesquisa que busca avanços significativos na tecnologia de soldagem. O desenvolvimento de plataformas de controle de processos e aquisições de sinais pelas próprias instituições se tornou uma das únicas alternativas para viabilizar a evolução científica desta área da fabricação.

Atualmente, na indústria nacional, têm-se a difusão significativa de três modalidades de soldagem a arco. A soldagem por meio de eletrodos revestidos, que mesmo com o baixo rendimento se apresenta ainda como o mais tradicional processo de soldagem aplicado na indústria, a soldagem MIG/MAG, que está ganhando cada vez mais espaço devido principalmente a sua produtividade, e a soldagem TIG, aplicada em áreas onde se necessita de qualidade no acabamento, na soldagem de chapas finas e obtenção de passes de raiz. Em menor escala surge o processo Plasma, bastante utilizado em revestimento de superfícies e união de juntas de topo. Um pouco tímidos no âmbito nacional existem ainda os processos híbridos, como o Plasma/MIG e o Laser/MIG, por exemplo, que possuem uma produtividade significativa elevada quando comparado as demais modalidades de soldagem.

É evidente que tamanha variabilidade de processos de soldagem proporciona, em laboratórios universitários e institutos tecnológicos, um número elevado de linhas de desenvolvimento, que por sua vez necessitam de

plataformas de apoio à pesquisa. Estas plataformas devem estar perfeitamente adaptadas a cada aplicação e, devido a significativa variação de funcionamento, lógicas de controle e configurações de hardware entre os processos de soldagem, nem sempre é possível o aproveitamento de uma mesma infra-estrutura para diferentes modalidades. De fato, a prática demonstra a existência de uma quantidade excessiva de sistemas controle e monitoramento dos processos dentro de uma mesma instituição de pesquisa.

No caso do LABSOLDA, que sempre buscou implementar suas próprias plataformas de controle e análise de processos de soldagem, o excesso de softwares e sistemas de comando e monitoramento acarreta dificuldades significativas na evolução dos mesmos com o decorrer do tempo. Devido as particularidades de cada processo, cada plataforma, como já citado, na maioria dos casos, é desenvolvida para uso exclusivo de uma determinada modalidade, com dispositivos de hardware e até mesmo linguagens de programação diferenciadas umas das outras.

Dessa maneira, além da dificuldade de aproveitamento da plataforma em outras linhas de pesquisa, também existe a dificuldade do próprio *up-grade* da mesma, já que o grau de especificidade do sistema atinge níveis que o tempo demandado para uma adequação a novas necessidades muitas vezes é maior que o da concepção de uma nova plataforma.

1.2 Objetivos

Em virtude da problemática apresentada iniciou-se no LABSOLDA um processo de padronização das interfaces de controle de processos e aquisição de sinais, buscando uniformizar as bancadas de desenvolvimento e com isso facilitar a utilização e a natural evolução dos dispositivos de hardware e estruturas de software. Assim, têm-se como premissas iniciais para este trabalho o seguinte objetivo geral:

Desenvolver um sistema de controle e aquisição de sinais flexível e padronizado, com uma interface amigável para o usuário, uma estrutura de hardware e software que permita sua atualização conforme evolução tecnológica e que sirva como fonte didática para o ensino da tecnologia de soldagem.

Dentre todo o potencial de flexibilização esperado para este sistema, cria-se a possibilidade de estruturar de forma mais adequada algumas linhas de pesquisa que já há algum tempo vêm sendo estudas no laboratório, como, por exemplo, o estudo de técnicas para estabilização do processo MIG/MAG pulsado, e melhores avaliações sobre o processo TIG CA, no que diz respeito a sua estabilidade e a geração de elevados níveis de ruídos. Dessa maneira surge como objetivos específicos, referentes à soldagem MIG/MAG pulsado, para este trabalho os seguintes pontos:

-
- i Propor novas lógicas na abertura de arco, visando reduzir o aporte térmico utilizado em boa parte dos equipamentos atuais;
 - ii Apresentar novos métodos de controle de altura de arco durante o processo de soldagem;
 - iii Desenvolver métodos de estabilização do arco voltaico na soldagem MIG/MAG por imposição de corrente, em situações críticas, como a utilização de correntes médias baixas, por exemplo;
 - iv Avaliar novas formas de onda de corrente de soldagem, visando estabelecer uma maior rigidez do arco voltaico.

Na linha concernente à soldagem TIG CA, os seguintes objetivos específicos são traçados:

- i Avaliar a influencia da taxa de transição da corrente de soldagem por zero na estabilidade do processo, a partir do ferramental disponibilizado pelo SAC
- ii Propor formas de onda suavizadas para a soldagem TIG CA, com intuito de controlar ruídos gerados nesta modalidade.

CAPITULO 2

HISTÓRICO E ANTECEDENTES DO TRABALHO

2.1 Histórico dos sistemas de controle e monitoramento de processos desenvolvidos no LABSOLDA

Desenvolvendo seus próprios sistemas de controle, monitoramento de processos e equipamentos de soldagem, o LABSOLDA atingiu o status de empreendedor, sendo referência em soldagem em âmbito nacional e em diversos países da América Latina.

No decorrer de sua história, o laboratório evoluiu sua infra-estrutura no ritmo que a tecnologia disponível no mercado avançava e as condições econômicas permitiam. Buscou-se, ao longo do tempo, criar ferramentas que fornecesse o respaldo adequado à pesquisa e ao ensino da soldagem, proporcionando o surgimento de linhas de desenvolvimento que vieram a financiar uma estruturação cada vez melhor do laboratório.

Dentre os diferentes desenvolvimentos que acompanharam o LABSOLDA nas últimas duas décadas estão os sistemas de controle e monitoramento de processos de soldagem a arco. Estas plataformas, fundamentais para o estudo da tecnologia da soldagem, estão em constante evolução e possuíram, neste tempo, características e topologias das mais diversas.

2.1.1 Primeiras Plataformas de Controle e Aquisição de Sinais

A primeira plataforma de controle e aquisição de sinais desenvolvida no LABSOLDA é datada do ano de 1985, intitulada *SISDATA*. Este sistema, que foi ferramenta fundamental para o desenvolvimento de uma tese de doutorado [1], era composto por uma fonte de soldagem, *ELMA ANALOG C400P* (ELMA), uma interface de hardware denominada *Interface Modular de Aquisição e Controle* (IMAC) e um microcomputador.

O microcomputador centralizava as ações de controle e aquisição de sinais. Para tanto, ele contava com softwares desenvolvidos no LABSOLDA que tinham funções de gerenciamento de variáveis e processamento de dados. Dentre os softwares desenvolvidos, todos em linguagem Pascal, os que tiveram maior destaque foram o *ArcoAn*, *Transp1*, *Transp2* e o *Pulso2ex*. Estes softwares permitiam a entrada das variáveis de soldagem em tempo real e, após a execução de um cordão de solda, disponibilizavam o arquivo de aquisição de sinais, tensão e corrente, resultante do processo.

O microcomputador se comunicava, via porta serial, com a interface de hardware IMAC, Figura 2.1, utilizando o protocolo *RS-232*. Esta interface de hardware baseada no processador Z-80 foi desenvolvida praticamente sob encomenda pelo LABMETRO com apoio administrativo da *Fundação Certi*. A IMAC permitia realizar aquisição de sinais e fechar malhas de controle a uma frequência de 5 kHz e possuía uma resolução de 8 bits. A interface em questão disponibilizava entradas e saídas analógicas e digitais, bem como cartões de relés, que eram utilizados para a sincronização no acionamento de dispositivos auxiliares à plataforma.

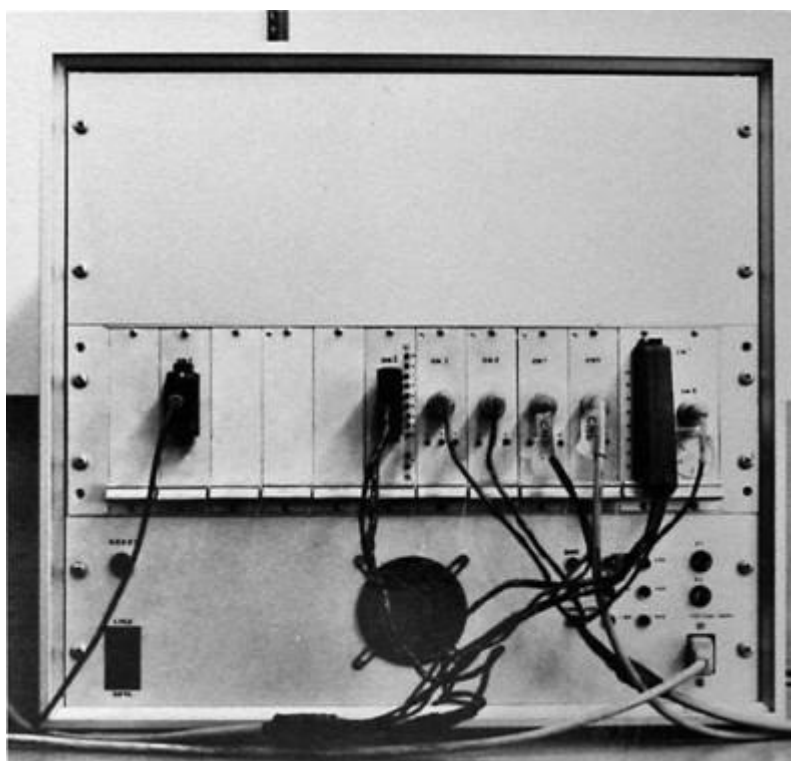


Figura 2.1- Foto da IMAC

A fonte de soldagem ELMA, Figura 2.2, parte integrante do *SISDATA*, era um equipamento de fabricação alemã que além de permitir, como toda fonte de soldagem, ser comandada a partir de ajustes em seu painel, também contava com a possibilidade de comando remoto de suas variáveis. Para tanto, disponibilizava entradas analógicas e digitais, através das quais a IMAC era conectada, completando assim a plataforma de controle.

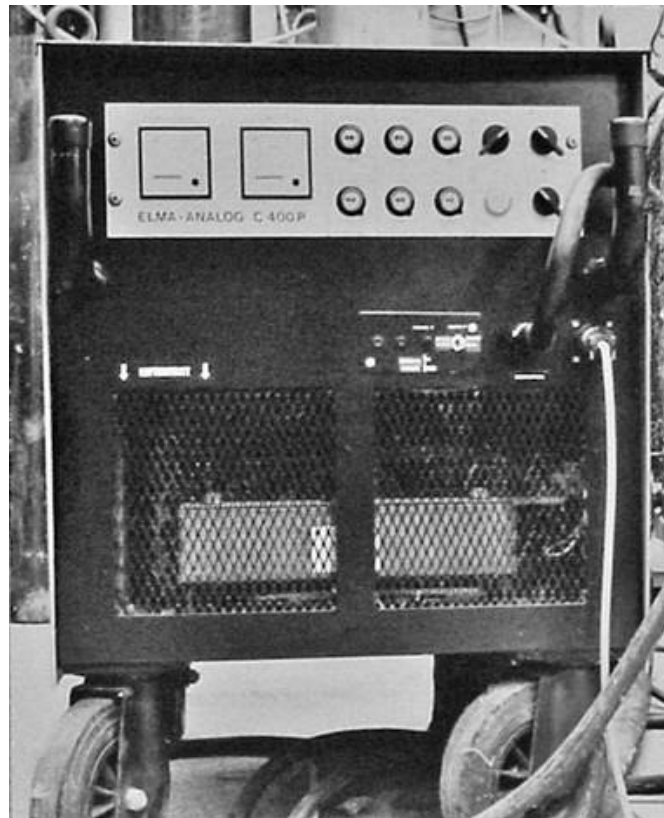


Figura 2.2 - Fonte de soldagem ELMA C400P

O *SISDATA* foi o precursor de todas as demais bancadas de ensino e pesquisa realizadas no LABSOLDA. A partir da topologia proposta para o já citado sistema iniciou-se uma evolução tanto de software quanto de plataformas de hardware dentro do laboratório.

Apesar de sua comprovadamente funcionalidade a plataforma em questão apresentava restrições tecnológicas que aos poucos a tornaram obsoletas às necessidades do LABSOLDA, consequência esperada devido a crescente evolução tecnológica da época. Dessa maneira, no início dos noventa foi implementada a placa de aquisição de sinais e controle *Interdata*, Figura 2.3, desenvolvida, em sua configuração básica, pelo *Laboratório de*

Manutenção (LAMAN) do departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, e com apoio direto da equipe de desenvolvimento do LABSOLDA.

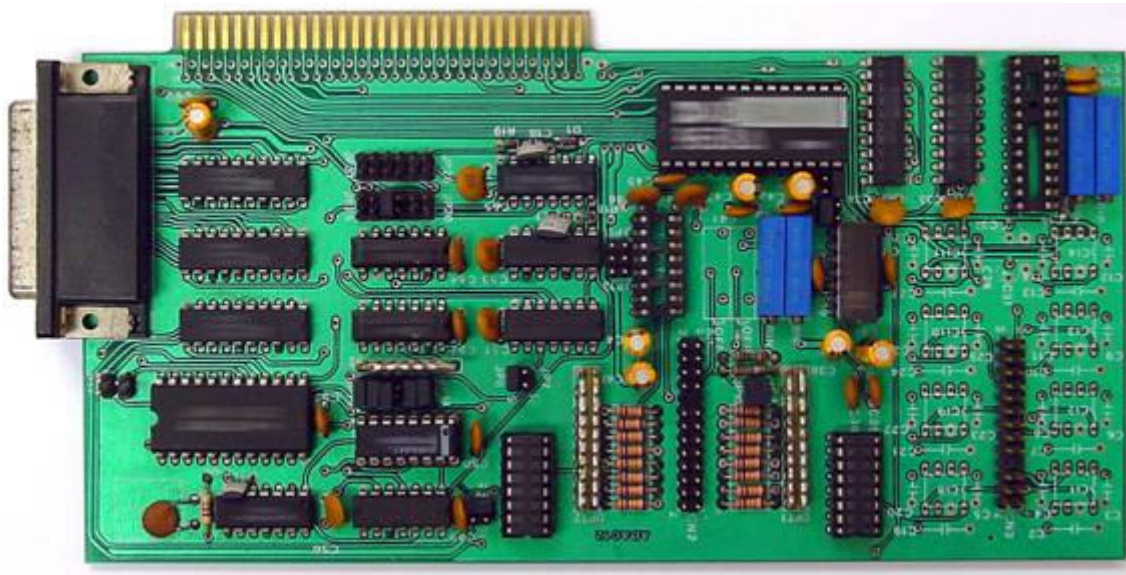


Figura 2.3 - Primeira versão da *Interdata*

A *Interdata* veio como substituta direta da *IMAC*, e apresentava como vantagens significativas a redução do volume do sistema (apenas uma placa que era acoplada ao *barramento ISA* do microcomputador e não mais um dispositivo em separado), além de possuir uma resolução de 12 bits, atingindo frequências de aquisição e controle na ordem de 40 kHz.

No entanto, com o desenvolvimento desta nova tecnologia, toda uma nova infra-estrutura de software teve que ser implementada, haja vista a configuração totalmente diferente que essa nova plataforma disponibilizava. Nesta nova estrutura, a fonte de soldagem era conectada diretamente ao microcomputador, e este deveria gerenciar todas as lógicas de comando e aquisição.

Os primeiros softwares desenvolvidos nesta nova geração foram concluídos por volta do ano de 1993 e permitiam apenas aquisição de sinais, *Oscilos2*, Figura 2.4, e tratamento de dados, *MIG/MAG*, Figura 2.5.

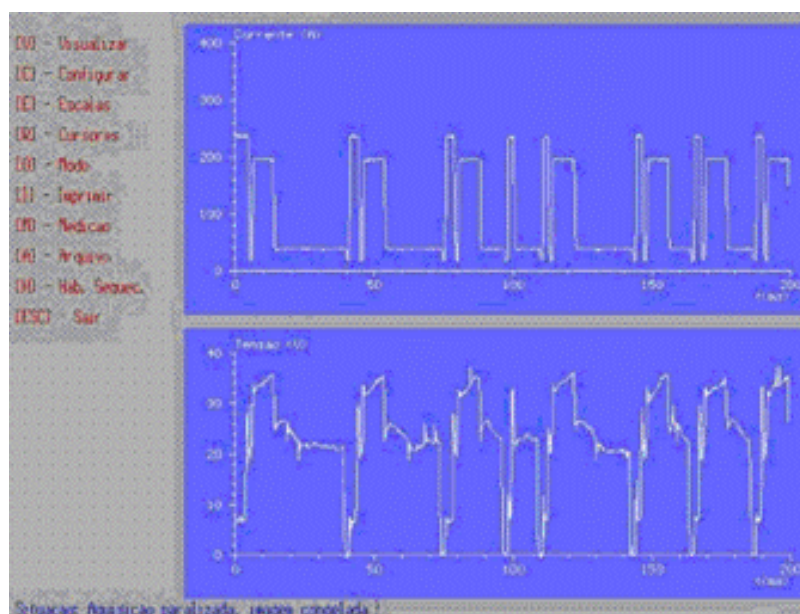


Figura 2.4 – Interface do software *Oscilos2*

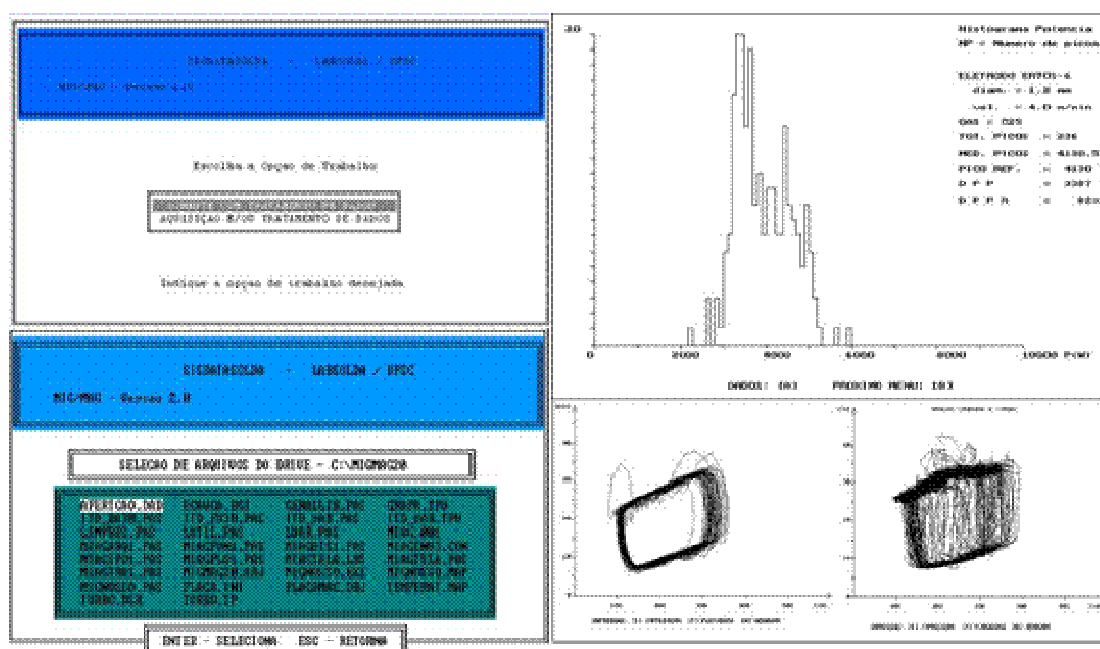


Figura 2.5 – Interface do software *MIG/MAG*

Com esta concepção inicial somente de aquisição de sinais, foram concebidos os primeiros dispositivos de instrumentação de soldagem do LABSOLDA, o *Medidor de velocidade de alimentação de arame-eletrodo* (MVA), o *Medidor de Tensão e Corrente para processos de soldagem* (TC-1) e o *Medidor de Vazão de Gás* (MVG), Figura 2.6.



Figura 2.6 - Dispositivos de instrumentação (TC-1, MVA e MVG)

Dando seqüência a evolução plataformas de pesquisa e desenvolvimento do LABSOLDA, aproveitando-se das propriedades que a nova estrutura, *Interdata*, disponibilizava, iniciou-se, timidamente, a implementação de lógicas de controle que utilizavam as saídas analógicas da já citada placa, para comandar dispositivos de soldagem. A primeira experiência que se obteve

neste sentido, foi o comando das variáveis de *tensão de referência* (Uref) e *velocidade de alimentação de arame-eletrodo* (Va), ainda na fonte de soldagem “ELMA ANALOG C400P”. Efetivamente, a filosofia utilizada para controlar essas variáveis não correspondia a um controle propriamente dito, haja vista a ausência de realimentação no sistema, ou seja, a “Interdata” impunha à fonte de soldagem Uref e Va, e não checava se estes valores estavam sendo respeitados durante o cordão de solda. Apesar de ainda em seus primórdios, a idéia de controlar um equipamento de soldagem a partir da *Interdata* começava a se amadurecer, e aos poucos uma nova filosofia de comando de processos surgia no LABSOLDA.

2.2 Nova estruturação das plataformas de controle de processos e aquisições de sinais

No contínuo crescimento tecnológico do LABSOLDA, pode-se afirmar que um marco histórico representativo foi o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado [2], que evoluiu para a construção da fonte de soldagem Inversal 300/450 (Inversal), Figura 2.7, a qual contribuiu significativamente para os avanços direcionados às plataformas de controle de processos e aquisições de sinais dentro do laboratório.

A Inversal foi projetada para funcionar como um laboratório de soldagem, ou seja, em uma mesma fonte era viabilizada a utilização de diversos processos de soldagem a arco, MIG/MAG, Plasma, TIG e Eletrodo Revestido. Entretanto, a funcionalidade que potencializou a utilização deste equipamento

em plataformas de controle de processos foi a disponibilização no painel da fonte de soldagem de entradas analógicas responsáveis pelo comando remoto do dispositivo e de saídas analógicas correspondentes à aquisição de sinais de tensão e corrente nos bornes do equipamento. Dessa maneira, era possível, por meio de um único canal de comunicação com a fonte de soldagem, executar o comando e a aquisição de sinais simultaneamente e em tempo real.

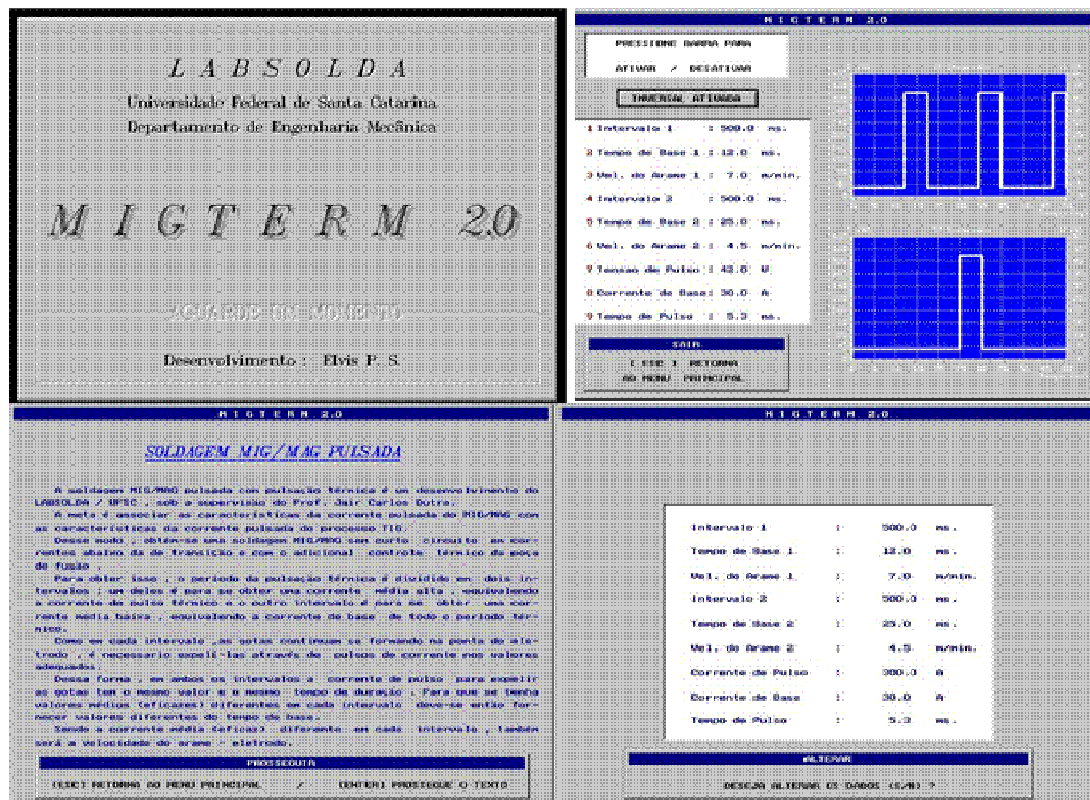


Figura 2.7 - Fonte de soldagem Inversal

Em função da nova topologia que a Inversal disponibilizava para as bancadas de desenvolvimento do laboratório, ou seja, o acesso fácil e já processado dos sinais de controle e aquisições, houve a necessidade de adaptações nos softwares responsáveis pelo gerenciamento dos processos de soldagem. Em um primeiro momento, adaptaram-se os softwares *MIG/MAG* e *Oscilos2* para funcionar junto à Inversal, com a função de aquisição de sinais e,

posteriormente, com propriedades de comando dos processos de soldagem do equipamento, mas ainda sem a já referida realimentação, necessária para a execução do controle em tempo real.

A contribuição dada pelo desenvolvimento da fonte de soldagem Inversal ao LABSOLDA pôde ser observada nos subseqüentes projetos em que o laboratório se engajou, nos quais, o referido equipamento foi ferramenta fundamental de apoio à pesquisa. Em meados de 1996 iniciou-se o desenvolvimento do processo MIG Pulsado Térmico em um projeto financiado pela *Tractebel* para a recuperação de pás de turbinas hidráulicas desgastadas pelo efeito da cavitação. Nesse desenvolvimento implementou-se o software *MIGTERM*, Figura 2.8, sendo este, o precursor de uma série de programas que continham interfaces gráficas mais elaboradas e uma relativa complexidade no comando de suas variáveis. Este programa comandava os níveis de corrente de saída da Inversal, para que a mesma reproduzisse as formas de onda utilizadas no desenvolvimento do processo.

Figura 2.8 - Interface do software *MIGTERM*

Este projeto culminou com o surgimento da fonte de soldagem *MTE Digitec* (Digitec), que apresentava como principal característica o controle digital sobre suas variáveis, além de, assim como a Inversal, permitir a soldagem nas modalidades TIG, MIG/MAG, Eletrodo Revestido e Plasma, porém apenas em corrente contínua. A Figura 2.9 ilustra a aplicação em campo da Digitec.



Figura 2.9 – Fonte de soldagem *MTE Digitec* em operação

2.3 Implementação de softwares mais complexos de controle de variáveis dos processos

Em paralelo com o desenvolvimento do processo MIG Pulsado Térmico, iniciou-se no LABSOLDA, também utilizando a estrutura de controle de processos que a Interdata juntamente com a Inversal disponibilizavam, pesquisas relacionadas à soldagem Plasma. Este processo apresenta, como característica marcante no que diz respeito à filosofia de controle utilizada, a necessidade de um perfeito sincronismo entre as diversas variáveis do processo, tais como, corrente de soldagem, vazão de gás plasma, e até a velocidade de arame-eletrodo no caso do processo Plasma Alimentado. A

sensibilidade desta modalidade à flutuações de seus parâmetros ou a variações de sincronismo tornou necessária a implementação de um laço de realimentação nas rotinas de controle do softwares incontornável. Pode-se afirmar que esta nova linha de pesquisa do LABSOLDA, na época, foi a propulsora de uma série de softwares de controle de processos de soldagem, que têm suas filosofias e lógicas de implementação influenciando as tendências de programação do laboratório até os dias atuais.

Os softwares desenvolvidos nesta linha de pesquisa foram o *Plasma_PUL*, Figura 2.10, *Plasma_TERM* e *Plasma_AC*. Estes programas construíam as formas de onda de corrente, vazão de gás e velocidade de arame-eletrodo, quando preciso, a partir de parâmetros informados pelo operador, assim como os sincronismos necessários ao perfeito funcionamento do processo.

Entretanto, devido sua comprovada eficiência, continuam até os dias atuais sendo utilizados e foram ferramentas fundamentais para elaboração de uma tese de doutorado [3]. Porém, estes softwares apresentavam problemas relacionados à sua flexibilidade. Para cada variação que se desejava obter nos princípios de funcionamento do processo, bem como simples alterações no sincronismo das variáveis, eram necessárias implementações complexas no código do programa, resultando em uma versão específica para cada aplicação.

Esta dificuldade é constatada nos próprios exemplos supracitados, onde para o mesmo processo de soldagem, Plasma, tem-se três versões de software de controle, para pulsação simples, pulsação térmica e para soldagem em corrente alternada.

1 - CORRENTE tempo Pulso [s] : 1.00 tempo Base [s] : 1.00 Corrente de Pulso - [A] : -100.00 corrente de Base - [A] : -50.00 tempo subida [s] : 10.00 tempo de Saida [s] : 5.00	
2 - ARAME velocidade Arame [m/min] : 5.10 tempo subida [s] : 0.00 tempo descida [s] : 0.00 P-> PULSADO C->CONTINUO :	3 - GAS vazao Gas [l/min] : 1.20 tempo subida [s] : 10.00 tempo descida [s] : 5.00
4 - VELOCIDADE DE SOLDAGEM Velocidade [cm/min] : 25.00 D-> DIREITA E->ESQUERDA : M-> move P->Para [mm] : posicaoA :	
5 - CONFIGURACAO Tempo de soldagem [s] : 20.00 tempo De pre - Gas [s] : 2.00 Corrente inicial [A] : -20.00 tempo de pos Gas [s] : 2.00 Corrente final [A] : -20.00 tempo ini. cor. [s] : 2.00 vel. ar. inicial [m/min] : 0.10 tempo fim. cor. [s] : 1.00 vel. ar. final [m/min] : 0.00 tempo ini. arame [s] : 4.00 gas inicial [l/min] : 0.50 tempo fim arame [s] : 2.00 gas final [l/min] : 0.50 tempo ini. vel. sol [s] : 2.00 tempo inicio gas [s] : 2.00 tempo fim. vel. sol [s] : 0.00 tempo fim gas [s] : 0.00 gas manutencao [l/min] : 0.40 tempo finalizacao [s] : 10.00	
TECLAS DE FUNCAO BARRA DE ESPACO --> TERMINA A SOLDA H --> INICIA A SOLDA Q --> SAI PARA O DOS	
SITUACAO TEMPO	

Figura 2.10 - Interface do software *Plasma-PUL*

As pesquisas com o a soldagem Plasma trouxeram a tona questões relevantes com relação à possibilidade de implementação de formatos de onda dos processos de forma não convencional. Até este momento, toda e qualquer manipulação feita com as diferentes modalidades de soldagem era baseada em conceitos pré-estabelecidos pela literatura, com controle simples de variáveis e formatos de onda convencionais de corrente, tensão, entre outros.

A possibilidade de se criar formas de onda diferenciadas para cada necessidade de pesquisa, bem como a implementação de diferentes lógicas de controle, começavam a chamar a atenção da equipe do LABSOLDA na época, em razão a ampliação de horizontes que estas hipóteses geravam.

Como primeiro passo na direção da pesquisa de processos de soldagem que apresentavam formatos de onda pouco convencionais e lógicas de controle diferenciadas, implementou-se, no final dos anos noventa, o software *MIG_AC*. Este programa viabilizou as pesquisas relacionadas ao processo MIG/MAG em

corrente alternada, que apresenta na literatura uma variabilidade de propostas, tanto de controle, quanto de formatos de onda para a corrente de soldagem, bastante grande [4],[5][6]. Assim como nos softwares desenvolvidos para as pesquisas relacionadas à soldagem pelo processo plasma, o *MIG_AC* construía a forma de onda de corrente a partir de parâmetros informados pelo operador, porém apresentando uma liberdade muito maior de desenho, bem como uma estrutura de software mais aberta, o que permitia a implementação de linhas de código de forma mais fácil, já que este foi o primeiro software de controle inteiramente desenvolvido em *linguagem C*.

Na mesma época iniciaram-se as pesquisas relacionadas ao processo *Curto-Circuito-Controlado* (CCC), ou *Surface Tension Transfer* (STT), como foi batizado pelo fabricante americano de equipamentos de soldagem *Lincoln Electric*. Este processo apresentava características bastante especiais se comparada às demais modalidades de soldagem, tanto do ponto de vista de controle de variáveis, quanto do formato de onda de corrente utilizado. Desenvolveu-se um sistema de controle de processo e aquisição de sinais específico para esta modalidade, já que a mesma apresentava propriedades únicas e até então inexploradas pela equipe do LABSOLDA. O software de controle desenvolvido, chamado de *Digi2000*, Figura 2.11, foi implementado em linguagem C e , assim como o *MIG_AC*, apresentava a construção da forma de onda do processo a partir de dados fornecidos pelo operador. Esta bancada de desenvolvimento foi ferramenta fundamental para uma dissertação de mestrado [7], que apresentou os primeiros resultados obtidos no LABSOLDA para o processo em questão.

Figura 2.11 - Interface do software *Digi2000*

2.4 Nova geração de softwares de controle e aquisição de dados do LABSOLDA

Como já citado, a primeira plataforma de controle e aquisição de sinais desenvolvida no LABSOLDA é datada da metade dos anos oitenta e é contemporânea ao advento da informática no mundo. Nesta época, os microcomputadores disponibilizavam de forma quase que intransigente o sistema operacional MS-DOS embutido em praticamente todos os *PC*'s. Apesar da incontestável eficiência na manipulação de arquivos, configurações de hardware e implementações de sistemas de tempo real, a plataforma MS-DOS deixa bastante a desejar na sua interface com o operador. Ações simples de navegação dentro do sistema exigem prévio conhecimento de comandos e mnemônicos, o que dificulta sua difusão em meio à boa parte dos usuários.

Estas dificuldades foram observadas em todos os segmentos de mercado que começavam a utilizar estes novos recursos, entretanto, as vantagens que

este novo sistema de processamento trazia para a época ofuscavam qualquer dificuldade no que diz respeito à interface com o usuário.

O LABSOLDA, em meio a estas inovações tecnológicas, seguiu a tendência do mercado e da ciência, e buscou, nesse conjunto de ferramentas produzido pela informática, adaptar suas necessidades de pesquisa e desenvolvimento. Dessa maneira, todos os sistemas de controle e aquisição de sinais desenvolvidos no LABSOLDA até o *MIG_AC* e o *Digi2000* foram implementados sobre a plataforma MS-DOS, que nesta época já se mostrava incapaz de proporcionar o suporte necessário à pesquisa, principalmente no que diz respeito à sua interface.

Apesar de se obter resultados significativos, a dificuldade de manipulação das formas de onda começava a ficar evidente, principalmente devido à quantidade de variáveis que começavam a ser envolvidas na construção dos processos, além de não se ter com clareza uma informação visual do formato da onda. Qualquer tentativa de exposição gráfica esbarra na dificuldade encontrada nas poucas ferramentas gráficas que o MS-DOS disponibiliza. É comum, por exemplo, que o código gerado para uma interface gráfica simples, como oscilogramas e menus, fosse substancialmente mais longo que todas as lógicas de controle, aquisição de sinais e configuração de hardware juntas. Esta problemática fizera com que os sistemas de controle e aquisição de sinais desenvolvidos no laboratório não evoluíssem sua interface com o usuário no mesmo ritmo que novos softwares de controle eram implementados.

Na metade da década de noventa surge o MS-Windows, a princípio apenas como um software de navegação simples e intuitiva dos sistemas microprocessados da época, posteriormente já como um sistema operacional

propriamente dito. O potencial desta nova ferramenta era evidente, entretanto a inércia na substituição de antigos conceitos e as dificuldades operacionais em alguns casos específicos impostos pela nova tecnologia, fez com que avanços neste sentido demorassem um pouco a acontecer.

A possibilidade de se utilizar a flexibilidade do ambiente gráfico disponibilizado pelo MS-Windows era bastante atrativa, principalmente no que diz respeito ao desenho de formas de ondas não convencionais para os processos de soldagem a partir do “mouse”, ferramenta exclusiva do sistema operacional em questão. A fácil manipulação de uma quantidade significativa de variáveis também cooperava para uma tendência à substituição dos antigos sistemas de monitoramento e controle de processos desenvolvidos no LABSOLDA. Porém, toda uma nova filosofia de implementação dos sistemas deveria estruturada e partir de então se iniciar novos desenvolvimentos.

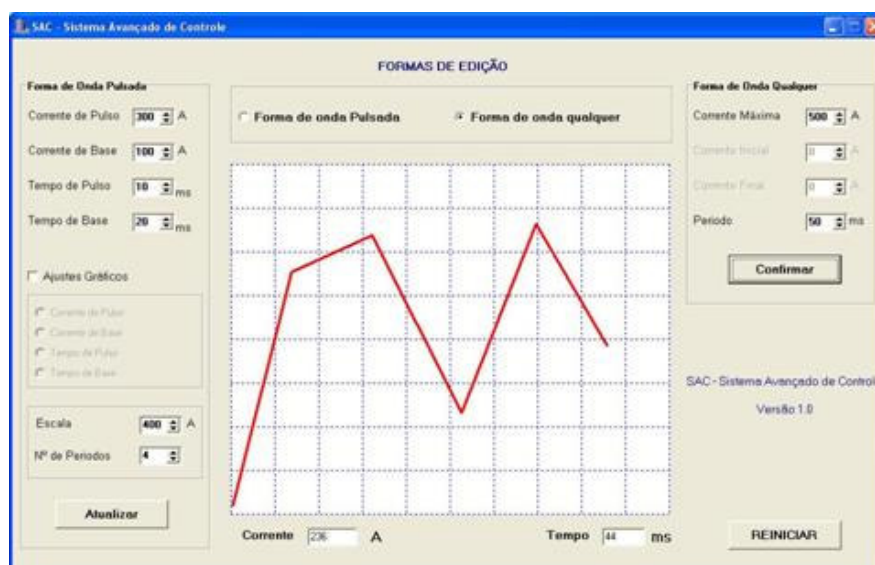


Figura 2.12 – Primeira Interface do Sistema Avançado de Controle

O primeiro software de manipulação de formas de onda desenvolvido no LABSOLDA em ambiente MS-Windows é datado do ano de 2002, e esta já correspondia a primeira versão do *Sistema Avançado de Controle* (SAC), foco desta dissertação, Figura 2.12.

Mesmo ainda em seus primórdios, esta primeira versão do SAC permitia o desenho de formas de onda e também era capaz de gerenciar o processo MIG/MAG Pulsado, porém, sem o compromisso com a soldagem em si, apenas se apresentava como um protótipo promissor para um futuro sistema de controle de processos e aquisições de sinais.

As características obtidas nessa versão protótipo criaram perspectivas de transformar o SAC, não só em uma ferramenta de gerenciamento de formas de onda, como a princípio havia sido idealizada, mas sim, como uma plataforma que servisse de apoio para qualquer pesquisa e desenvolvimento realizados dentro do LABSOLDA, padronizando, dessa maneira, todos os softwares até então implementados em uma só interface de controle.

CAPITULO 3

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA AVANÇADO DE CONTROLE

3.1 Introdução

Os sistemas de aquisições de sinais e controle de processos, bem como toda tecnologia voltada à informática, necessitam de constantes atualizações em virtude da acelerada evolução das plataformas computacionais e os avanços tecnológicos da microeletrônica. Neste sentido, no LABSOLDA, a implementação de ferramentas a serem utilizadas para pesquisa e desenvolvimento e o elevado volume de softwares e dispositivos desenvolvidos esbarram na estrutura verticalizada observada no laboratório, fator que dificulta a constante atualização e adequação às novas tecnologias.

Como consequência imediata da defasagem tecnológica, tem-se a dificuldade em encontrar peças de reposição ou até plataformas completas para se reproduzir o sistema desenvolvido. Desta maneira, boa parte das estruturas de controle e aquisição de sinais acaba por cair em desuso por se tornarem obsoletas às condições encontradas no mercado.

De uma maneira geral, a manutenção de uma plataforma de controle de processos e aquisição de sinais por um determinado tempo sofre a influencia dos problemas referentes ao inevitável avanço da informática, da diversidade de linguagens de programação utilizadas na implementação dos softwares, e as diferentes infra-estruturas de hardware adotadas para cada aplicação, como mencionado no capítulo 2.

Em virtude do grau de especificidade das plataformas de controle e aquisição de sinais utilizados nas bancadas de pesquisa e desenvolvimento no LABSOLDA, os sistemas desenvolvidos para estes fins acabam se tornando exclusivos de uma determinada aplicação, o que prejudica o reaproveitamento da infra-estrutura e a conseqüente evolução do sistema.

Com o quadro histórico apresentado é evidente que determinadas frentes de desenvolvimento acabaram se tornando inviáveis devido ao tempo necessário para o resgate de antigas tecnologias e também a impossibilidade de aquisição de plataformas de hardware que se encontravam fora de linha no mercado. Esta situação exige novos rumos no desenvolvimento dos sistemas de monitoração de processos de soldagem e controle, padronizando as plataformas, tendo em mente o contínuo avanço tecnológico da atualidade.

Neste sentido, desenvolveu-se o Sistema Avançado de Controle como uma plataforma de aquisição de sinais e controle de processos de soldagem, no entanto, estruturada para que suas propriedades sejam aproveitadas nas diversas bancadas de desenvolvimento do laboratório. Sua concepção se apresenta de forma útil e abrangente o suficiente para dar respaldo as necessidades específicas de cada linha de pesquisa, disponibilizando ferramentas e propriedades diferenciadas de qualquer outro sistema antes implementado no LABSOLDA.

3.2 Disposição do Sistema Avançado de Controle

O Sistema Avançado de Controle foi implementado, para que, acima de tudo, fosse eficiente e flexível, tanto às diferentes linhas de pesquisa do LABSOLDA, quanto para absorção de novas tecnologias, permitindo sua contínua evolução de acordo com as necessidades do laboratório.

Para tanto, estruturou-se a plataforma como é ilustrado na Figura 3.1. O SAC deve possuir uma interface amigável com o operador, que facilite a intervenção do mesmo nos diferentes processos de soldagem que o sistema comandar, bem como, disponibilizar ferramentas que dêem suporte à manipulação de formas de onda de soldagem, de forma simples e efetiva.



Figura 3.1 – Disposição Conceitual do Sistema Avançado de Controle

O *sistema de controle* da plataforma, como ilustra a Figura 3.1, é o responsável por decodificar os comandos dados pelo operador e agir diretamente sobre o *atuador do sistema*. Por outro lado, o *sistema de aquisição* faz as leituras das variáveis de soldagem e as exibe novamente ao usuário por meio da interface da plataforma.

Desta forma, a disposição conceitual do SAC, quando implementada, adquire formatos condizentes com a tecnologia disponível no mercado e de domínio da equipe do LABSOLDA. A disposição física do Sistema Avançado de Controle, Figura 3.2, conta com dois microcomputadores que se comunicam por meio de suas portas seriais, responsáveis pela interface com o usuário (CPU 1), aquisição de sinais e controle dos processos (CPU 2). O atuador do sistema é a fonte de soldagem Inversal 450 [2], inteiramente desenvolvida no LABSOLDA e, portanto, de amplo conhecimento de toda equipe do laboratório.

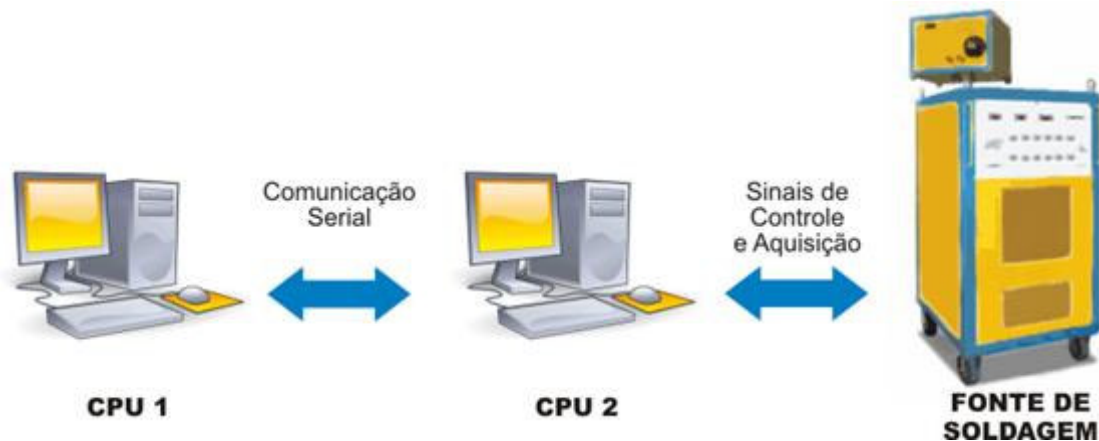


Figura 3.2 - Disposição física do Sistema Avançado de Controle

A utilização de duas *CPU's* para concepção do SAC advém do fato de se necessitar de dois sistemas operacionais diferentes na atual plataforma, o MS-Windows e o MS-DOS. Conforme comentado no capítulo 2, apesar do fornecimento de ferramentas para tratamento de processos em tempo real altamente funcionais, o Ms-DOS não disponibiliza uma interface com o usuário versátil nos níveis de exigência do SAC. Por outro lado, o Ms-Windows, fornece uma interface altamente intuitiva com o operador, porém, dificulta intervenções substanciais de hardware,

aspecto extremamente necessário para o efetivo controle dos processos de soldagem.

Neste sentido, estruturou-se as lógicas de controle do SAC sobre o programa *Oscilos v 3.1*, uma versão otimizada do antigo software de aquisição de sinais de soldagem desenvolvido no laboratório, *Oscilos2*. Dessa maneira, todas as lógicas de intervenção sobre a fonte de soldagem ficam agrupadas na CPU 2, que faz tanto o controle dos processos de soldagem quanto a aquisição de sinais.

A interface de controle, no entanto, foi totalmente desenvolvida sobre a plataforma MS-Windows, CPU 1, que permite o rápido acesso as variáveis de cada processo, bem como, a flexibilidade do desenho de formas de onda de soldagem nas diferentes modalidades, utilizando-se das ferramentas gráficas que a plataforma em questão disponibiliza.

O uso de duas unidades de processamento, apesar de inadequado do ponto de vista funcional e até econômico, permitiu o desenvolvimento paralelo do SAC, acelerou os progressos na sua implementação, além de criar o conceito de modularidade da plataforma, ou seja, a perfeita distinção entre cada vertente do sistema, controle, aquisição, interface e atuação, o que o torna apto a se moldar a novos conceitos tecnológicos que venham a surgir com o decorrer do tempo.

3.3 Estruturação da Interface com o Usuário (CPU 1)

O software de interface em ambiente MS-Windows, antes de ser implementado, passou por uma análise de requisitos necessários à estruturação do programa. A partir disso, utilizando técnicas de Engenharia de Software, desenvolveu-se o código propriamente dito.

Os requisitos básicos que o Sistema Avançado de Controle deve atender em sua interface com o usuário são os seguintes:

- i Criar um ambiente amigável e intuitivo utilizando técnicas de ergonomia de interface gráfica;
- ii Possibilitar o desenho de formas de onda de corrente de soldagem tanto DC quanto AC, a partir de manipulações com o mouse em procedimento similar de um editor de imagens;
- iii Viabilizar o controle dos processos de soldagem convencionais, com manipulação de variáveis em tempo real;
- iv Disponibilizar um protocolo de comunicação simples para acompanhamento dos avanços tecnológicos da informática nos próximos anos.

A estruturação do software em ambiente MS-Windows, com a análise de requisitos feita, leva o sistema a ser caracterizado basicamente por uma estrutura de dados [14,15], visto que boa parte do conteúdo do software, principalmente, o controle de processos de soldagens convencionais são variáveis de sistema e ferramentas.

A partir da idéia de estrutura de dados, desenvolveu-se os diagramas de classes, ferramenta essencial no direcionamento da programação orientada à objetos, tendo como referência a utilização de uma plataforma capaz de oferecer suporte a este tipo de estruturação, o *Borland C++ Builder*.

3.3.1 Diagrama de classes

A estrutura de dados foi montada obedecendo a regras primárias de orientação objetos e com ferramentas disponíveis na linguagem C++, como herança e polimorfismo [14], conforme apresentado na

Figura 3.3.

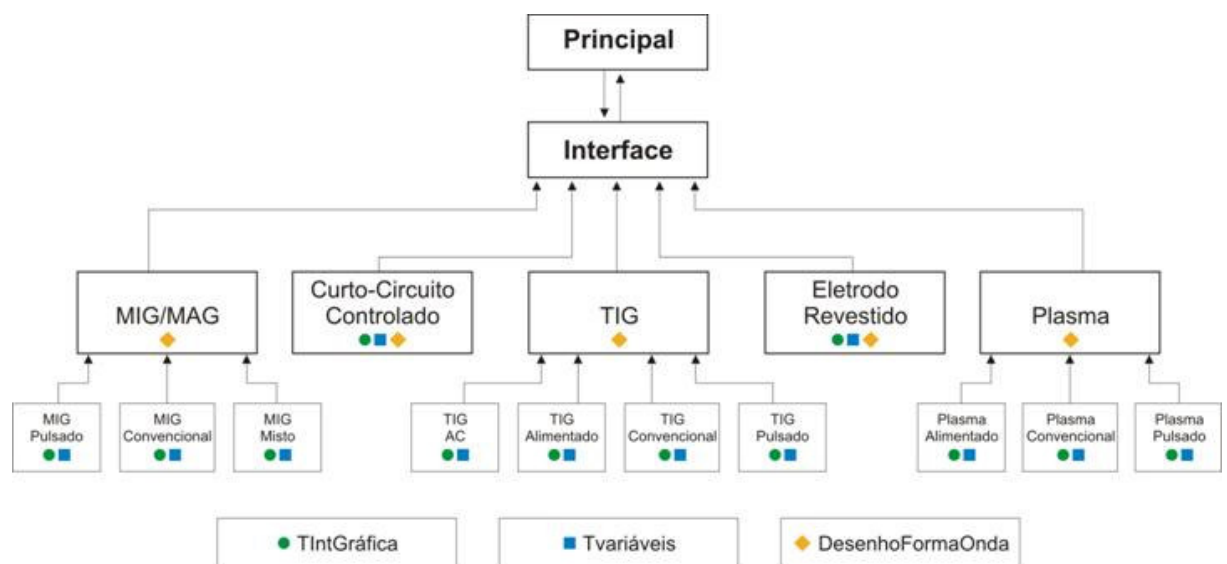
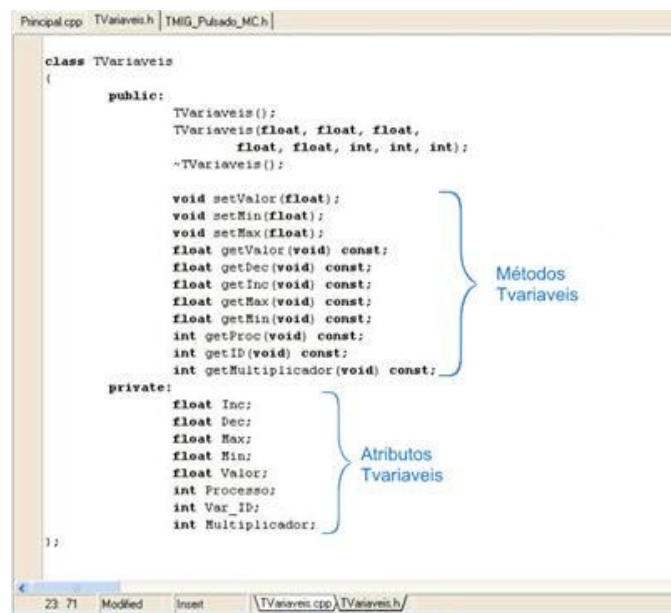
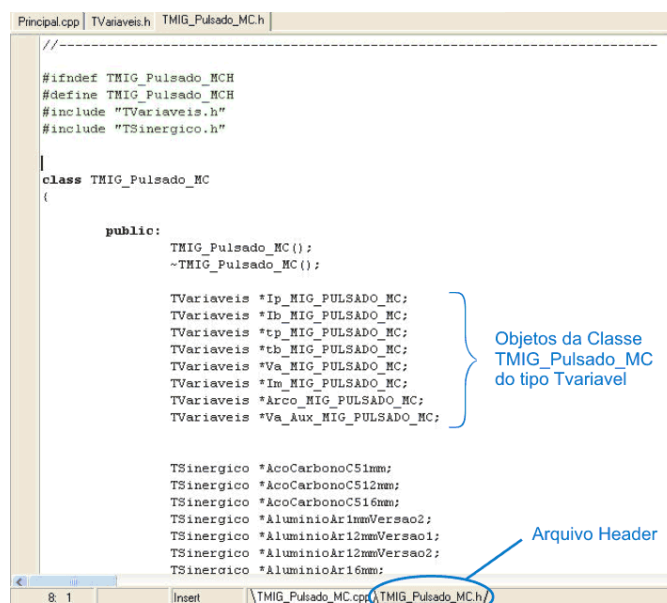


Figura 3.3 - Estrutura de classes do SAC (CPU 1)

A base desta estrutura está na classe *Tvariáveis* que contempla todos os métodos e atributos necessários ao armazenamento e manipulação das variáveis de qualquer processo de soldagem implementado no software. Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Protótipo da classe *Tvariaveis*

De acordo com a estrutura apresentada, cada classe específica de processo, *MIG_Pulsado* por exemplo, cria por meio de seu arquivo *header*, tantos objetos da classe *TVariaveis* quanto ao número necessário de variáveis nesta determinada modalidade de soldagem, observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Protótipo da classe *TMIG_Pulsado*

A utilização da propriedade de herança da *linguagem C++*, propicia que os objetos da classe *TVariaveis*, criados dentro de cada modalidade de soldagem, compartilhem dos mesmos métodos e atributos, fazendo com que seja otimizada a alocação de memória para a execução do programa e se torne mais clara a visualização do fluxo de informação.

As classes específicas de cada processo de soldagem, por serem simples manipuladores de dados, têm a única e exclusiva função de atribuírem valores iniciais às suas próprias variáveis, por meio de seus construtores, apresentada na Figura 3.6, exceção feita apenas as classes correspondentes à desenhos de formas de onda, nas quais alguns métodos são implementados.

```
//-----  
#include "migcon.h"  
//-----  
//-----  
  
cMigCon::cMigCon()  
{  
    Variaveis.identificador = 0x677773;  
    Variaveis.processo = 3;  
    Variaveis.tambuff = sizeof(Variaveis);  
    Variaveis.Va = 3;  
    Variaveis.Vamin = 0;  
    Variaveis.Vamax = 20;  
    Variaveis.Ks = 10;  
    Variaveis.Ksmin = 0;  
    Variaveis.Ksmax = 30;  
    Variaveis.Kd = 10;  
    Variaveis.Kdmin = 0;  
    Variaveis.Kdmax = 30;  
    Variaveis.Uref = 23;  
    Variaveis.Urefmin = 0;  
    Variaveis.Urefmax = 50;  
}  
//-----
```

Construtor
da Classe
MIG_CONV

Figura 3.6 - Construtor da classe *MIG_Convencional*

No topo do diagrama de classes, conforme visto na Figura 3.3, há um fluxo de dados bidirecional entre as classes *Principal* e *Interface*. Apesar deste tipo de estruturação ir em sentido contrário às técnicas de programação de Engenharia de Software [14,15], foi a alternativa encontrada para contornar limitações impostas

pela plataforma de programação utilizada no desenvolvimento, o *Borland C++ Builder*.

3.3.1.1 Particularidades do Borland C++ Builder

Para o entendimento da necessidade de um fluxo bidirecional de dados no topo do diagrama de classes do SAC (CPU 1) é necessário ter um conhecimento prévio dos princípios básicos de funcionamento da plataforma *Borland C++ Builder* de programação.

O *Borland C++ Builder* apresenta um formulário padrão para o desenvolvimento de interfaces gráficas. Neste formulário, podem ser alocados objetos de qualquer natureza, disponíveis, é claro, na barra de ferramentas da plataforma. Estes objetos, botões e caixas de texto, por exemplo, apresentam suas propriedades acessíveis numa ferramenta chamada *Object Inspector*, disponibilizada pela plataforma de programação. Nesta mesma ferramenta, também, são disponibilizadas os eventos atrelados a cada *objeto*, ou seja, as funções que o mesmo é capaz de executar. No caso de um botão, por exemplo, têm-se *métodos* associados ao clique sobre o mesmo, a atribuição de teclas de atalho, entre outros, conforme visualização na Figura 3.7.

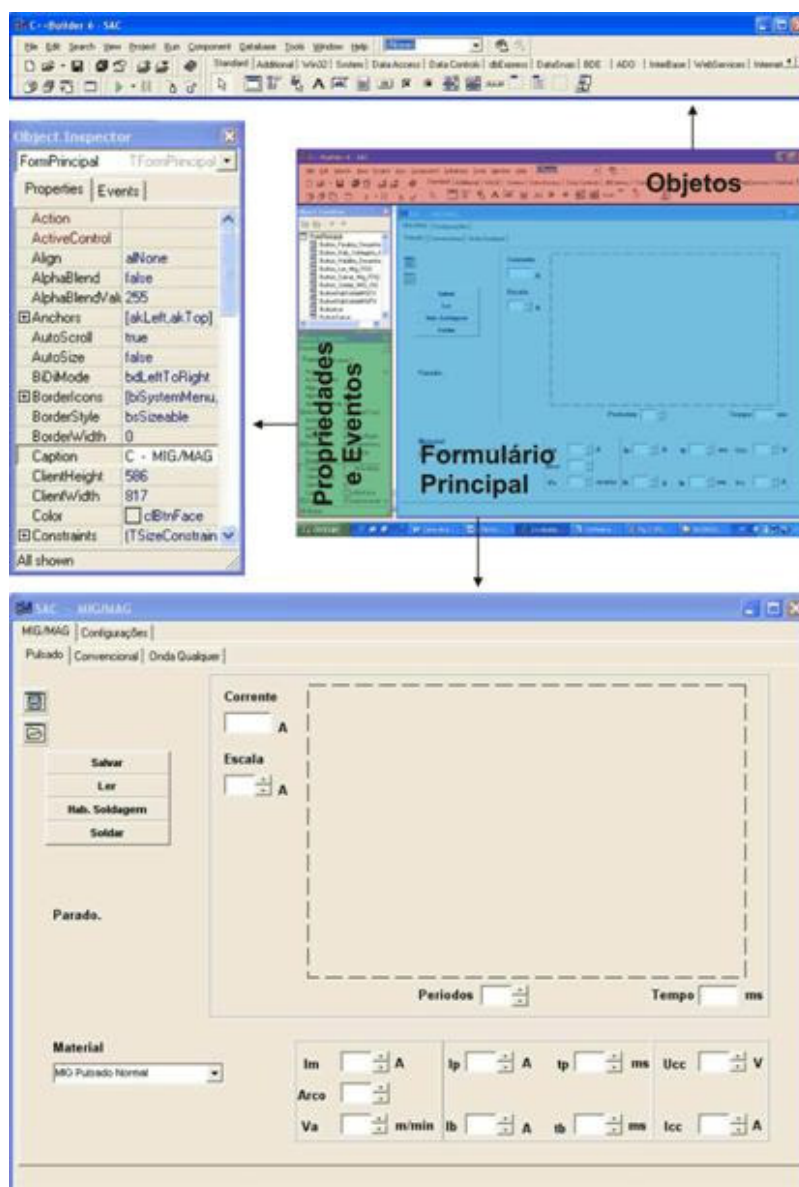


Figura 3.7- Área de trabalho do *Borland C++ Builder*

Para a implementação do SAC, parte das *propriedades* dos objetos é atribuída apenas durante o construtor inicial do software, ou seja, no momento em que se executa o programa, assim, referências como tamanho e posicionamento de objetos no formulário principal são ajustados. As propriedades alteram de forma pouco significativa durante toda a execução do software, o que permite considerar que são variáveis estáticas do programa.

Os eventos relacionados aos objetos do programa têm papel fundamental no funcionamento do software. É por meio dos eventos que o operador interage com o SAC (CPU 1) e suas rotinas de interface, ou seja, após iniciado o programa, o software entra em uma espécie de *modo de espera*, aguardando qualquer intervenção do usuário, para então, executar uma sequência de comandos pré-determinados pelo código criado.

Neste contexto, evidencia-se a necessidade de uma bidirecionalidade na hierarquia de classes do SAC (CPU 1). Na ocorrência de um evento, o *Borland C++ Builder* invariavelmente gera uma função no *script* principal do código do programa e a nomeia como *FastCall*, identificada na Figura 3.8.

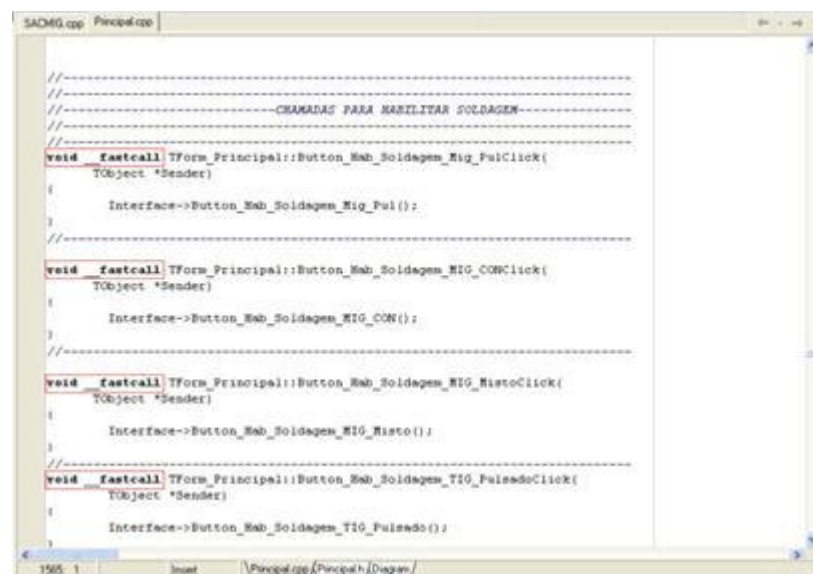


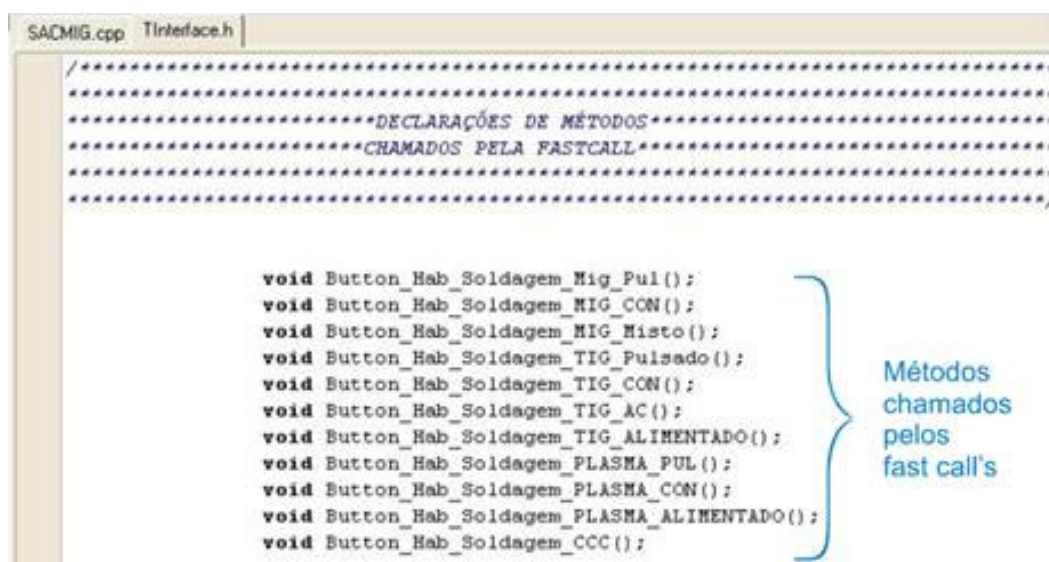
Figura 3.8 – Script principal do SAC (CPU 1)

Entretanto, os eventos atribuídos a muitos dos objetos disponíveis no software são bastante similares, e em alguns casos até idênticos, haja vista a existência de diversos objetos com exatamente a mesma função, como por exemplo, botões de incremento e decremento, caixas de exibição de variáveis, entre outras. Essa

identidade dos eventos faz com que o código do programa ganhe proporções exageradas e com redundância entre funções se incorretamente tratado.

Com objetivo de otimização de espaço em memória e melhor legibilidade do programa, manteve-se no arquivo *Principal* do software, apenas chamadas de métodos, direcionando todo o fluxo de informação para a classe *Interface*. Confirmando, assim, a necessidade de um fluxo de informação reverso ao tradicionalmente encontrado em estrutura de classes orientadas à objetos.

Na classe *Interface* está implementado o código correspondente aos diferentes *FastCall's* provenientes dos eventos associados do formulário principal do programa, conforme a Figura 3.9. Nesta classe, o código reconhece o objeto que está selecionado e direciona o fluxo de informação para a classe específica do mesmo, ou seja, *MIG_Pulsado*, *MIG_Convencional*, entre outras.



```
SACMIG.cpp  TInterface.h

/*****
*****DECLARAÇÕES DE MÉTODOS*****
*****CHAMADOS PELA FASTCALL*****
*****/

void Button_Hab_Soldagem_Mig_Pul();
void Button_Hab_Soldagem_MIG_CON();
void Button_Hab_Soldagem_MIG_Misto();
void Button_Hab_Soldagem_TIG_Pulsado();
void Button_Hab_Soldagem_TIG_CON();
void Button_Hab_Soldagem_TIG_AC();
void Button_Hab_Soldagem_TIG_ALIMENTADO();
void Button_Hab_Soldagem_PLASMA_PUL();
void Button_Hab_Soldagem_PLASMA_CON();
void Button_Hab_Soldagem_PLASMA_ALIMENTADO();
void Button_Hab_Soldagem_CCC();
```

Métodos chamados pelos fast call's

Figura 3.9 – Métodos da classe *TInterface*

Com esta estrutura é comum a prática de diferentes eventos direcionados para *FastCall*'s distintos apontarem para o mesmo método na classe *TInterface*, minimizando o número de linhas de código e padronizando a implementação do programa, observado na Figura 3.10.

```
//-----
//-----UpDown MIG Convencional-----
//-----
void __fastcall TForm_Principal::UpDown_Uref_MIG_CONClick(TObject *Sender,
TUpDownType Button)
{
    Interface->UpDown_INC_DEC(Form_Principal->Edit_Uref_MIG_CON, Form_Principal->UpDown_Uref_MIG_CON,
    Interface->MIG_Convencional->Uref_MIG_CON, Interface->getPosition_aux_Uref_MIG_CON());
}
//-----
void __fastcall TForm_Principal::UpDown_Va_MIG_CONClick(TObject *Sender,
TUpDownType Button)
{
    Interface->UpDown_INC_DEC(Form_Principal->Edit_Va_MIG_CON, Form_Principal->UpDown_Va_MIG_CON,
    Interface->MIG_Convencional->Va_MIG_CON, Interface->getPosition_aux_Va_MIG_CON());
}
//-----
void __fastcall TForm_Principal::UpDown_Ka_MIG_CONClick(TObject *Sender,
TUpDownType Button)
{
    Interface->UpDown_INC_DEC(Form_Principal->Edit_Ka_MIG_CON, Form_Principal->UpDown_Ka_MIG_CON,
    Interface->MIG_Convencional->Ka_MIG_CON, Interface->getPosition_aux_Ka_MIG_CON());
}
//-----
```

Figura 3.10 - *FastCall*'s direcionando o fluxo de dados para *TInterface*

3.3.2 Desenho de forma de onda qualquer

O diagrama de classes, Figura 3.3, ilustra a estrutura criada para dar suporte às rotinas de desenho de formas de onda nos diferentes processos de soldagem. A classe *DesenhoFormaOnda* é a responsável por todo o processamento das rotinas de desenho de formas de onda nos diferentes processos de soldagem que à empregam, e, também, pela padronização dos pacotes de dados provenientes destes desenhos antes da transmissão dos mesmos via comunicação serial para a CPU 2.

O desenvolvimento de uma plataforma capaz de atender estas rotinas exigiu a criação de uma estrutura à parte do Sistema Avançado de Controle, devido à especificidade deste procedimento. Os dados necessários para que a CPU 2, por meio de sua placa de controle e aquisição de sinais, seja capaz de reproduzir à

forma de onda desenhada na CPU 1 são processados de forma diferente aos demais processos gerenciados pelo software, criando a necessidade de se ter um script no programa exclusivo para o tratamento destes dados, *DesenhoFormaOnda*.

A proposta concebida como mais adequada para o desenvolvimento desta ferramenta tem sua interface ilustrada na Figura 3.11, na qual são disponibilizados os parâmetros que devem ser ajustados antes do início do desenho propriamente dito.

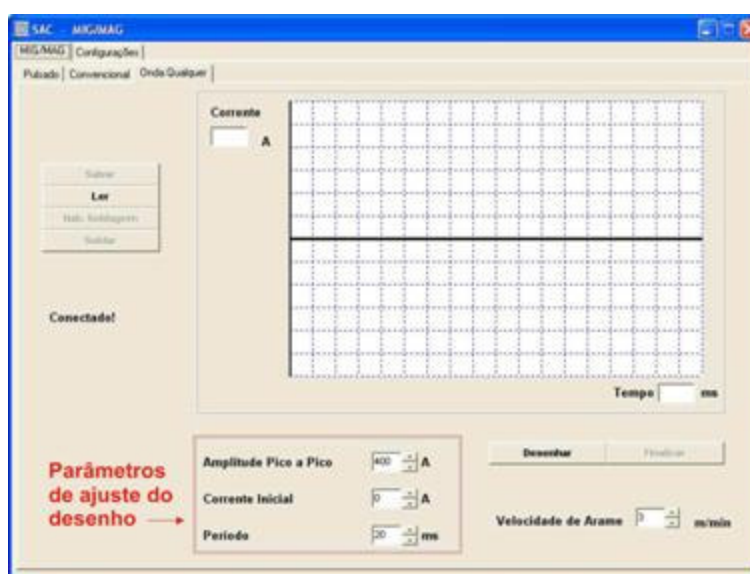


Figura 3.11 – Interface para o desenho de formas de onda no processo
MIG/MAG

Os parâmetros de ajuste têm a finalidade de adequação das escalas da área de desenho e, por meio destas, propiciar a regressão dos valores em 'pixels' da área de gráfico, para valores reais de corrente e tempo.

Após ajustados os campos de *Amplitude pico a pico*, *Corrente Inicial* e *Período* o desenho pode ser iniciado por meio de um clique no botão *Desenhar*. O desenho da forma de onda é feito por meio de cliques na área do gráfico que são unidos ponto a ponto por retas em vermelho como se pode observar na Figura 3.12.

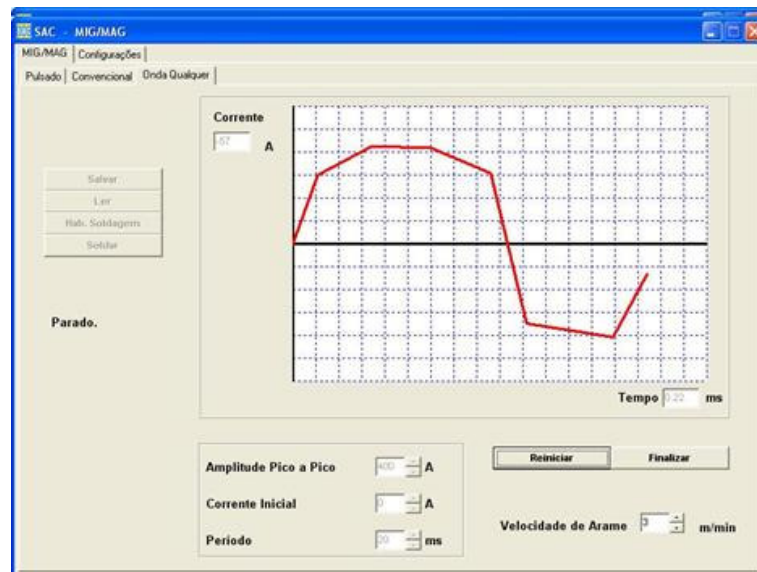


Figura 3.12 – Desenho de forma de onda no processo MIG/MAG

O término do desenho é dado com um clique no botão *Finalizar* que, neste momento, une o último ponto desenhado com o seu correspondente no final do período à *corrente Inicial*, isso para, obviamente, manter a continuidade do período ao longo do tempo.

Durante toda a execução do desenho, a cada novo clique válido na área de gráfico, o software armazena este ponto, dado em *pixels*, em uma matriz que vai aumentando a sua ordem à medida que mais pontos são introduzidos ao desenho. Somente após a finalização do desenho, o botão *Habilita Soldagem* é disponibilizado, e por meio de um clique no mesmo o sistema inicia uma série de cálculos que culminam com o envio dos dados, já processados, para a CPU 2.

Os cálculos executados pelo software consistem, primeiramente, na regressão da matriz de pontos em valores de corrente e tempo. Cada ponto é definido por um par ordenado na área de gráfico, dando a posição do mesmo em coordenadas 'x' e 'y'. Por meio dos valores ajustados para *Amplitude Pico a Pico* e

Período, antes de iniciar o desenho, é possível, com uso de matemática simples, chegar a uma nova matriz de pontos, agora já com seu conteúdo em termos de corrente e tempo, visualizado na Figura 3.13.

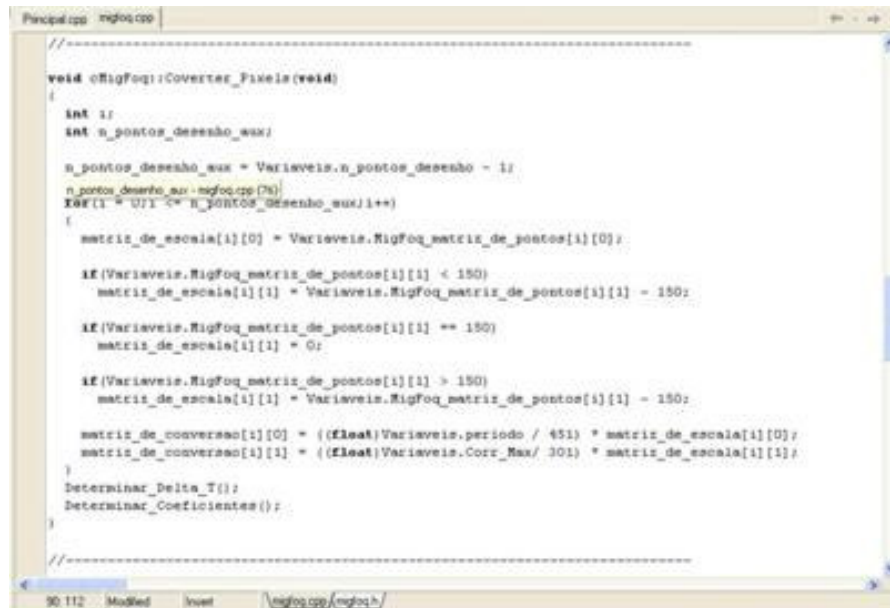


Figura 3.13 – Trecho do código de conversão dos pontos do desenho

Seguindo o objetivo da estrutura proposta de minimizar as rotinas de processamento da CPU 2, os dados que são transmitidos via comunicação serial para a CPU 2 precisam estar organizados em forma de vetores, contendo coeficientes lineares e angulares e ainda intervalos de tempo, correspondentes a cada reta desenhada durante o processo de montagem da forma de onda, conforme visto na Figura 3.14.

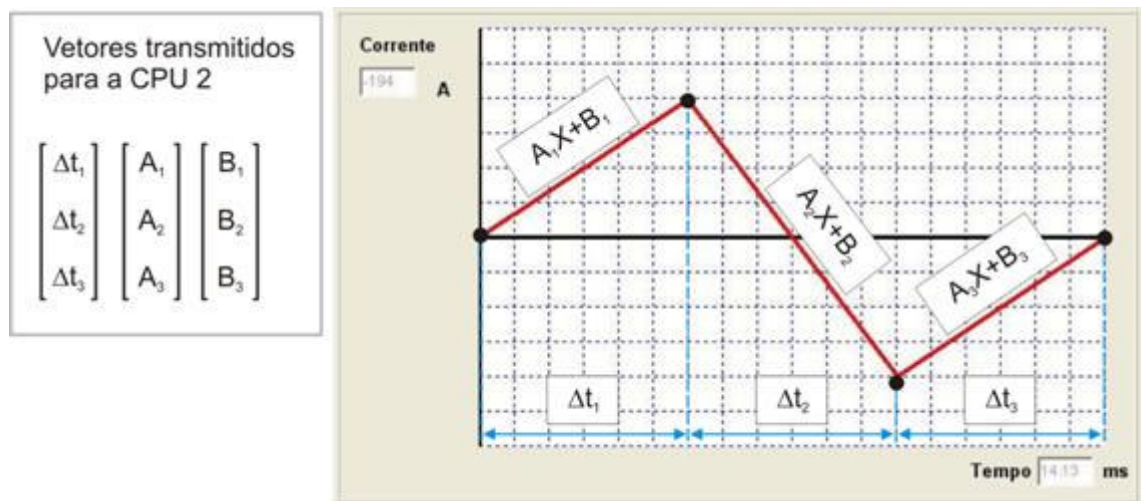


Figura 3.14 – Obtenção dos vetores de dados

A matriz de pontos calculada com valores correspondentes a corrente e tempo deve ser dissociada em vetores contendo os coeficientes de cada reta, apresentado na Figura 3.15.

```

Principal.cpp  migloq.cpp

void cMigFog::Determinar_Coeficientes(void)
{
    int n_coeficientes_desenho;
    float aux;

    n_coeficientes_desenho = Variaveis.n_pontos_desenho - 2;

    for(i = 0; i <= n_coeficientes_desenho; i++)
    {
        aux = (100 * ((float)(matriz_de_conversao[i + 1][1] - matriz_de_conversao[i][1])));
        if(aux > 32000)
            aux = 32000;
        if(aux < -32000)
            aux = -32000;
        matriz_de_coeficientes[i][0] = (int) aux;
        matriz_de_coeficientes[i][1] = matriz_de_conversao[i][1];
    }
}

//-----

void cMigFog::Determinar_Delta_T(void)
{
    int n_delta_T;

    n_delta_T = Variaveis.n_pontos_desenho - 2;

    for(i = 0; i <= n_delta_T; i++)
        vetor_delta_T[i] = (int) 10 * (matriz_de_conversao[i + 1][0] - matriz_de_conversao[i][0]);
}

```

Figura 3.15 – Trecho do código de geração de vetores

A CPU 2 processa a forma de onda de corrente baseada nos vetores transmitidos e mantém a execução da mesma no decorrer do tempo enquanto nenhum novo comando de processo ou nova forma de onda for desenhada e transmitida.

3.4 Protocolo de Comunicação entre as CPU's

A comunicação entre as duas unidades de processamento foi baseada em um protocolo para a transmissão serial de dados. O protocolo de comunicação estruturado seguiu critérios que possibilitem sua utilização para a transmissão de qualquer tipo de dado independente de processo de soldagem, fator que viabiliza o emprego deste protocolo para implementação de modalidades especiais, como o desenho de formas de onda, por exemplo.

A implementação foi possível tanto na interface MS-Windows, como na interface MS-DOS, através de códigos de comunicação entre as CPU's independentes da estruturação do sistema criado, aspecto facilitador para o reaproveitamento do protocolo em outras aplicações e para sua substituição no caso da implantação de novas tecnologias de comunicação.

O protocolo de comunicação consiste no envio de quatro bytes para cada variável que se deseja transmitir, com intuito de obter sua perfeita identificação. Os bytes são chamados de *processo*, *comando* e dois correspondentes ao *dado*, necessariamente transmitidos nesta ordem para a correta interpretação do pacote de informação, observado na Figura 3.16.

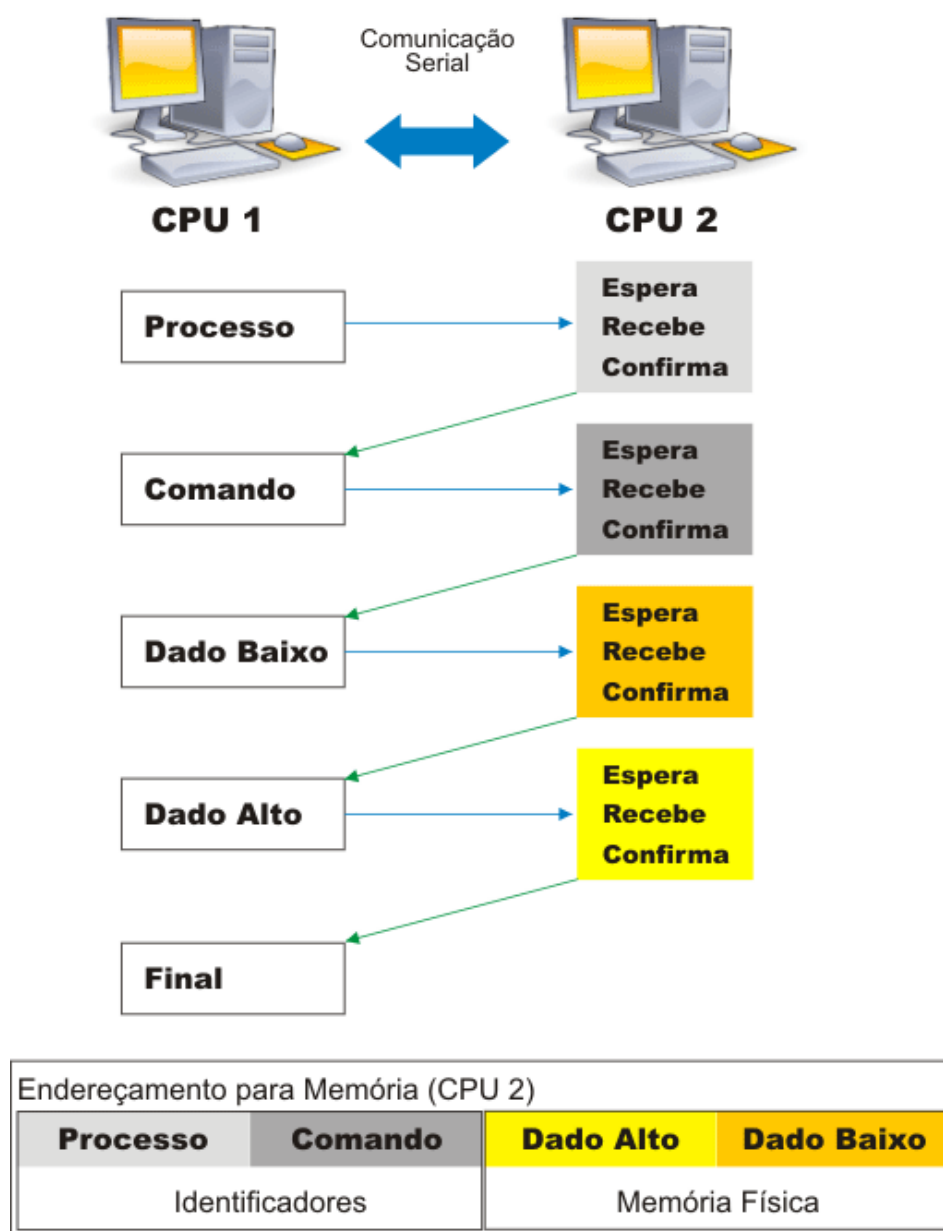


Figura 3.16 – Protocolo de comunicação serial utilizado pelo SAC

O byte *processo* corresponde a identificação da modalidade de soldagem a qual pertence a variável que está sendo transmitida. Desta forma, tem-se um byte diferente para cada processo de soldagem, MIG Pulsado, MIG Convencional, TIG AC e assim por diante. Em seqüência ao envio do *processo*, a CPU 1 transmite o byte *comando*, correspondendo a identificação da variável em si. Para o caso da

soldagem MIG Pulsado, por exemplo, tem-se *corrente de base*, *corrente de pulso*, *velocidade de arame*, entre outras. Cada processo de soldagem tem um conjunto de *comandos* que são identificados um a um na CPU 2. Finalmente, a última palavra a ser transmitida são os dois bytes correspondentes ao *dado*, que é o valor da variável propriamente dita, como *400 A*, *3 m/min*, *14 l/min*, exemplos correspondentes às variáveis de corrente, velocidade de alimentação de arame e vazão de gás, respectivamente. A necessidade de utilização de dois bytes para a palavra *dado* visa exclusivamente proporcionar maior resolução para as variáveis do sistema, permitindo incrementos e decrementos bastante suaves durante a utilização do SAC.

Conforme observado na Figura 3.16, para cada byte enviado pela CPU 1, a CPU 2 responde um caractere de confirmação indicando o sucesso na transmissão. Esta confirmação é utilizada como indicador para que o próximo byte seja transmitido, ou para que alerte o usuário, caso não haja confirmação, de que há incidência de erro com a comunicação entre as duas unidades de processamento.

3.5 Estruturação do Sistema de Controle e Aquisição (CPU 2)

A estrutura criada para a plataforma de aquisição de sinais e controle da fonte de soldagem do Sistema Avançado de Controle, CPU 2, baseia-se em um software desenvolvido anteriormente no LABSOLDA, que é utilizado em bancadas de ensaios ou até mesmo em equipamentos portáteis de aquisição de dados, o *Oscilos v 3.1*.

O *Oscilos v 3.1*, concebido apenas para aquisição de dados, foi implementado sobre a placa de tratamento de sinais *Interdata v 3.0*, desenvolvida no LABSOLDA. Esta placa disponibiliza sinais analógicos e digitais a partir do barramento PCI da

placa mãe do microcomputador. O código do *Oscilos v 3.1* foi implementado em linguagem de programação de alto nível, utilizando-se do software *Turbo Pascal* como compilador.

Com o desenvolvimento do SAC, surgiu a necessidade de criação de uma plataforma de controle paralela à aquisição de sinais, desenvolvida no *Oscilos v 3.1*, atrelando aos códigos existentes novas estruturas de programação. Dessa maneira, originou o *SACOSCR*, o software responsável pelo controle da fonte de soldagem e pela aquisição de sinais no Sistema Avançado de Controle.

Assim, como no software desenvolvido em ambiente MS-Windows, fez-se uma análise básica de requisitos que o *SACOSCR* deve atender para suprir as necessidades de controle e aquisição de sinais desejadas no SAC, são elas:

- i Freqüência de atualização dos sinais de controle de 10 kHz;
- ii Freqüência de aquisição de sinais de 10 kHz;
- iii Estruturação das rotinas de controle utilizando-se de técnicas de Engenharia de Software, facilitando assim alterações de código por usuários avançados do sistema.
- iv Permitir alteração dos parâmetros de soldagem em tempo real;
- v Flexibilizar as rotinas de controle dos processos de soldagem, permitindo alterações significativas nos princípios de funcionamento de cada modalidade, com fins de pesquisa.

Os requisitos traçados para o software *SACOSCR* demonstram a característica multitarefa do programa. Em uma primeira análise, dada a diversidade das tarefas que devem ser executadas pelo software, o *SACOSCR* caracteriza-se

pela necessidade de processamento paralelo de suas rotinas. Neste tipo de situação, torna-se praticamente inviável a implementação de uma estrutura de laço único de execução, isto é, um programa que tenha um fluxo contínuo com rotinas sendo executadas uma após a outra, o que demanda um tempo de processamento exagerado, não sendo possível garantir os tempos de atualizações requisitados no sistema.

A solução amplamente utilizada para sistemas de tempo real que necessitam de alguma espécie de processamento paralelo para garantir a execução de tarefas em intervalos de tempo bem definidos é a estruturação baseada em interrupções. Com base em técnicas de Engenharia de Software, define-se um fluxo principal de execução sem compromisso, a princípio, com temporizações, e laços de execução secundária acionados a partir de interrupções internas ao sistema, garantindo, por meio destes últimos, a fidelidade aos requisitos de tempo do software. A quantidade de rotinas secundárias que são executadas a partir de chamadas de interrupções, depende da complexidade do sistema e da capacidade da plataforma, no qual é desenvolvido o software, para disponibilizar tais interrupções.

3.5.1 Estruturação do software SACOSCR

Baseado em técnicas de Engenharia de Software, estruturou-se o *SACOSCR* com uma rotina principal e mais três laços de programação secundários acionados por meio de interrupções, apresentado na Figura 3.17.

A rotina principal do software se reserva apenas às funções básicas do sistema, como atualização dos oscilogramas de tensão e corrente e gerenciamento de menus, o que é basicamente as funções já executadas pelo software *Oscilos v*

3.1. As funções paralelas, executadas a partir das interrupções, são responsáveis pelas rotinas de controle e aquisição de sinais, e também pelo gerenciamento da comunicação serial feita entre as duas CPU's do SAC.

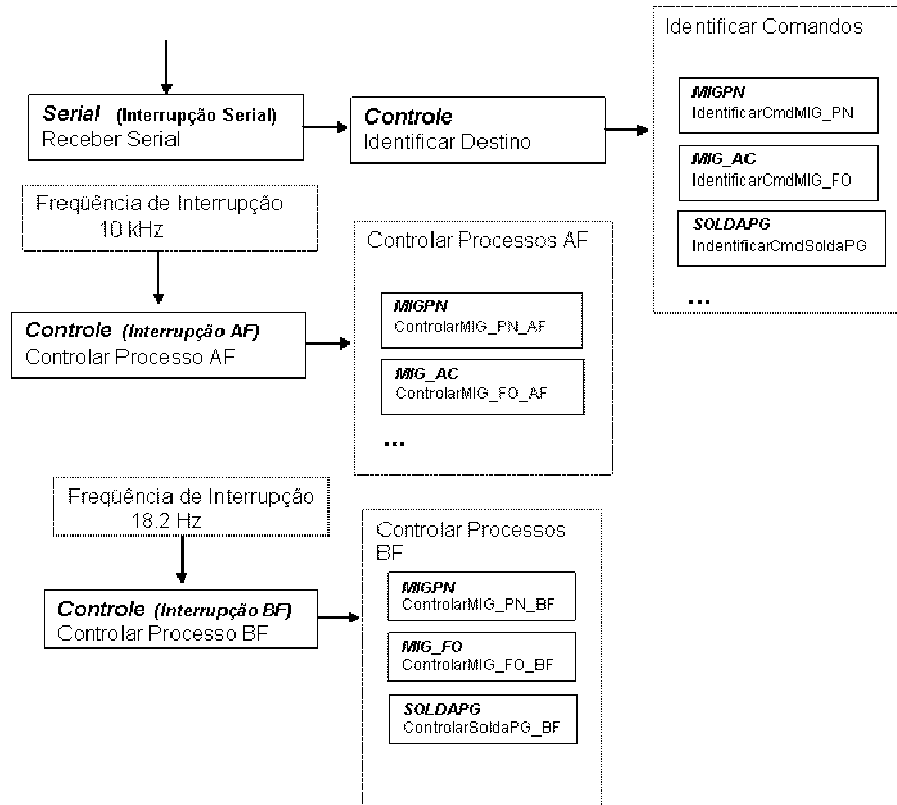


Figura 3.17 - Gerenciamento de interrupções do SAC (CPU2)

Como já mencionado, existe um fluxo principal de execução e processamentos paralelos acionados por meio de interrupções geradas por temporizadores internos ao sistema, *timers*, ou por meio de estímulos externos, como é o caso da comunicação serial.

A interrupção de *alta frequência* é temporizada a partir de *timers* disponibilizados pela placa *Interdata v 3.0* e ajustados por meio de software nas configurações do sistema para uma frequência fixa de 10 kHz. As rotinas executadas nesta interrupção são as responsáveis pela atualização das variáveis de controle da fonte de soldagem.

No caso do SAC, que utiliza a Inversal 450, as variáveis de controle necessárias para o correto funcionamento de qualquer processo de soldagem por meio de comando remoto são: corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame. Estas variáveis, dada sua importância e, no caso da corrente de soldagem, a necessidade em se ter respostas relativamente rápidas a estímulos ocasionados no arco voltaico, são processadas dentro da interrupção de *alta frequência*, garantindo, assim, a confiabilidade no controle dos processos.

A interrupção ajustada para aproximadamente 18,2 Hz é baseada no relógio do sistema, sendo que esta frequência não depende do software desenvolvido, pois é uma configuração do PC. A utilização desta interrupção se faz necessária pelo fato de controlar dispositivos auxiliares ao processo de soldagem, como acionamento de bomba d'água, válvula solenóide para vazão de gás entre outros. As rotinas desenvolvidas dentro desta interrupção também são responsáveis pelo monitoramento de ações do usuário, tais como o disparo para a partida e finalização do cordão de solda.

A interrupção correspondente à comunicação serial não tem, obviamente, uma frequência definida, já que o programa gera uma interrupção assim que um byte é recebido, e este último é transmitido conforme definido pelo usuário. Nesta interrupção estão todas as rotinas de interpretação dos dados transmitidos pela CPU 1 e também as responsáveis pela alocação de memória necessária no armazenamento das informações de cada processo.

Com esta estrutura proposta, é possível subdividir o software em quatro grandes grupos de rotinas independentes, quanto ao critério execução, permitindo a fácil compreensão das estruturas de controle e aquisição por parte do programador.

3.5.2 Programa Principal

O laço principal de execução do software é responsável pelo gerenciamento de todas as configurações do sistema, isto é, as rotinas de ações gráficas são todas desempenhadas no programa principal bem como o gerenciamento de menus a partir de comandos do teclado. O fluxograma da Figura 3.18 ilustra esta situação.

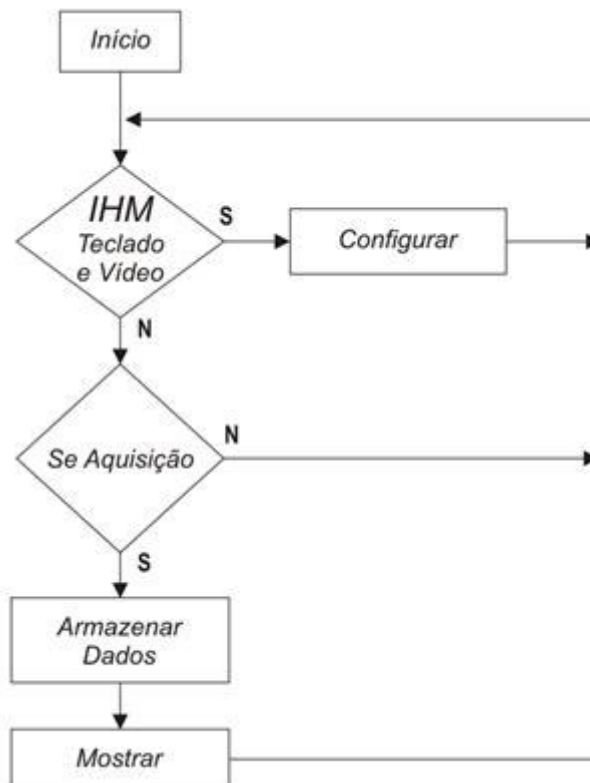


Figura 3.18 – Laço principal de execução do software *SACOSCR*

A utilização do software *Oscilos v 3.1* como base para a implementação do *SACOSCR* faz com que parte dos esforços necessários para o desenvolvimento da rotina principal de execução do programa sejam poupados. O reaproveitamento do código na nova estrutura acelerou o desenvolvimento do sistema, permitindo, com

poucas adaptações no código, que se estruturasse a plataforma para receber as rotinas de controle dos processos de soldagem.

Fundamentalmente, fez-se adaptações significativas apenas na classe *Controle*, conforme Figura 3.19. Esta classe que, anteriormente, gerenciava apenas as interrupções geradas para as aquisições dos sinais, foi reescrita para executar as chamadas das rotinas de controle de cada processo de soldagem.

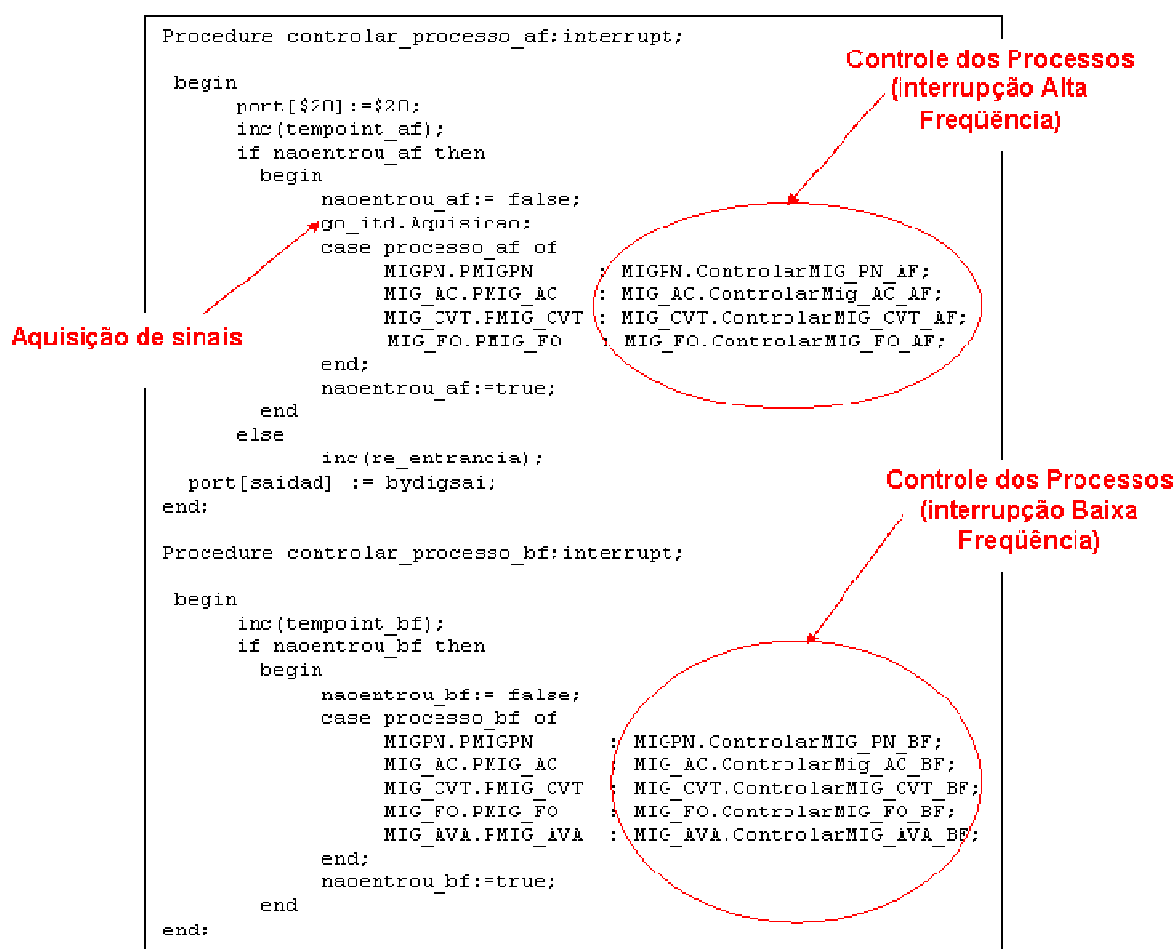


Figura 3.19 – Classe *Controle* do software *SACOSCR*

A partir do momento que a ‘CPU 1’ do SAC envia o comando, via porta serial, para habilitar determinado processo de soldagem, no mesmo pacote de dados está o identificador da modalidade em questão, que é utilizado pela classe ‘Controle’ para

distinguir as rotinas de interrupção que serão executadas no momento em que se iniciar a soldagem propriamente dita.

Conforme visto na Figura 3.19, existe na classe *Controle* uma rotina para os procedimentos de alta frequência e outra para os de baixa frequência. O programa é direcionado para estas rotinas logo que os *timers* do sistema terminam a sua contagem, neste caso, têm-se dois temporizadores, um para cada interrupção.

3.5.3 Interrupções do SACOSCR

Da mesma forma que o software desenvolvido em ambiente MS-Windows, a estrutura do *SACOSCR* deve ser simples e versátil, para que eventuais adaptações e correções de problemas sejam de forma simples e rápida.

Com este intuito, foram criadas classes correspondentes a cada modalidade de soldagem, Figura 3.19, na qual implementadas as rotinas correspondentes às interrupções dos processos de soldagem em questão. Dessa forma, um determinado processo de soldagem fica restrito a um único arquivo dentro do software, facilitando a interpretação do código por parte do programador.

Seguindo esta idéia, observa-se que um determinado processo de soldagem, em relação ao *SACOSCR*, não passa de rotinas executadas a partir de interrupções, sendo possível, praticamente, o total desmembramento das funções de controle dos processos de soldagem com o resto do software. Este desmembramento viabiliza a programação paralela, isto é, desenvolve-se um novo processo de soldagem, a partir da implementação de uma nova classe, independente do código principal do programa, aumentando a velocidade no desenvolvimento do sistema.

3.5.3.1 Interrupção de Alta Frequência (10kHz)

A interrupção ajustada para 10 kHz, como anteriormente mencionado, é a responsável direta pelas rotinas de controle dos processos. Isto significa que toda a lógica de controle de cada modalidade de soldagem está embutida nas rotinas chamadas a partir desta interrupção.

Dentro das rotinas de controle dos processos, além das lógicas específicas de cada modalidade, também existem *timers* secundários, isto é, temporizadores adaptados dentro destes laços de execução que efetuam a contagem de tempos fundamentais para o correto funcionamento de cada processo. Pode-se citar, como exemplo, o controle sobre as pulsações de corrente e/ou de tensão que algumas modalidades demandam, ou até mesmo a detecção de curto-circuitos e extinções de arco que eventualmente ocorrem durante a soldagem.

A implementação destas temporizações não utiliza diretamente os *timers* disponibilizados pela placa *Interdata v 3.0*. O cálculo de tais intervalos de tempo é executado mediante contadores incrementais adaptados a uma base de tempo definida a partir da frequência da interrupção, assim, sabendo-se que a cada 100us (10kHz) um novo laço de controle é feito, calcula-se quantas interrupções serão necessárias para que se tenha transcorrido o intervalo de tempo em questão.

```
Procedure Fase_Pulso;  
begin  
    inc(deltat);  
  
    Is := MPN.Ip;  
    Vaescreve := Va_realim;  
  
    if (deltat > MPN.tp) then  
    begin  
        fase := FBASE;  
        deltat := 0;  
    end;  
end;
```

Contador incremental

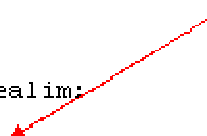


Figura 3.20 – Trecho do código da classe *MIGPN*

A Figura 3.20 ilustra a rotina de controle da *fase de pulso* do processo MIG Pulsado na interrupção de *alta frequência*. Constata-se, em destaque na ilustração, a temporização do tempo de pulso sendo executada de forma incremental.

3.5.3.2 Interrupção de baixa frequência (18,2 Hz)

Dada a sua função de apoio aos comandos periféricos da fonte de soldagem e dispositivo de alimentação de arame, as rotinas descritas dentro da interrupção de *baixa frequência* são bastante simples quando comparadas às lógicas de controle executadas na interrupção de *alta frequência*, conforme Figura 3.21, devido a ausência de compromisso com tempos de resposta e fidelidade das variáveis de controle. Em sua essência, os comandos executados dentro da interrupção de *baixa frequência* são apenas sinais digitais de acionamento e desligamento de periféricos.

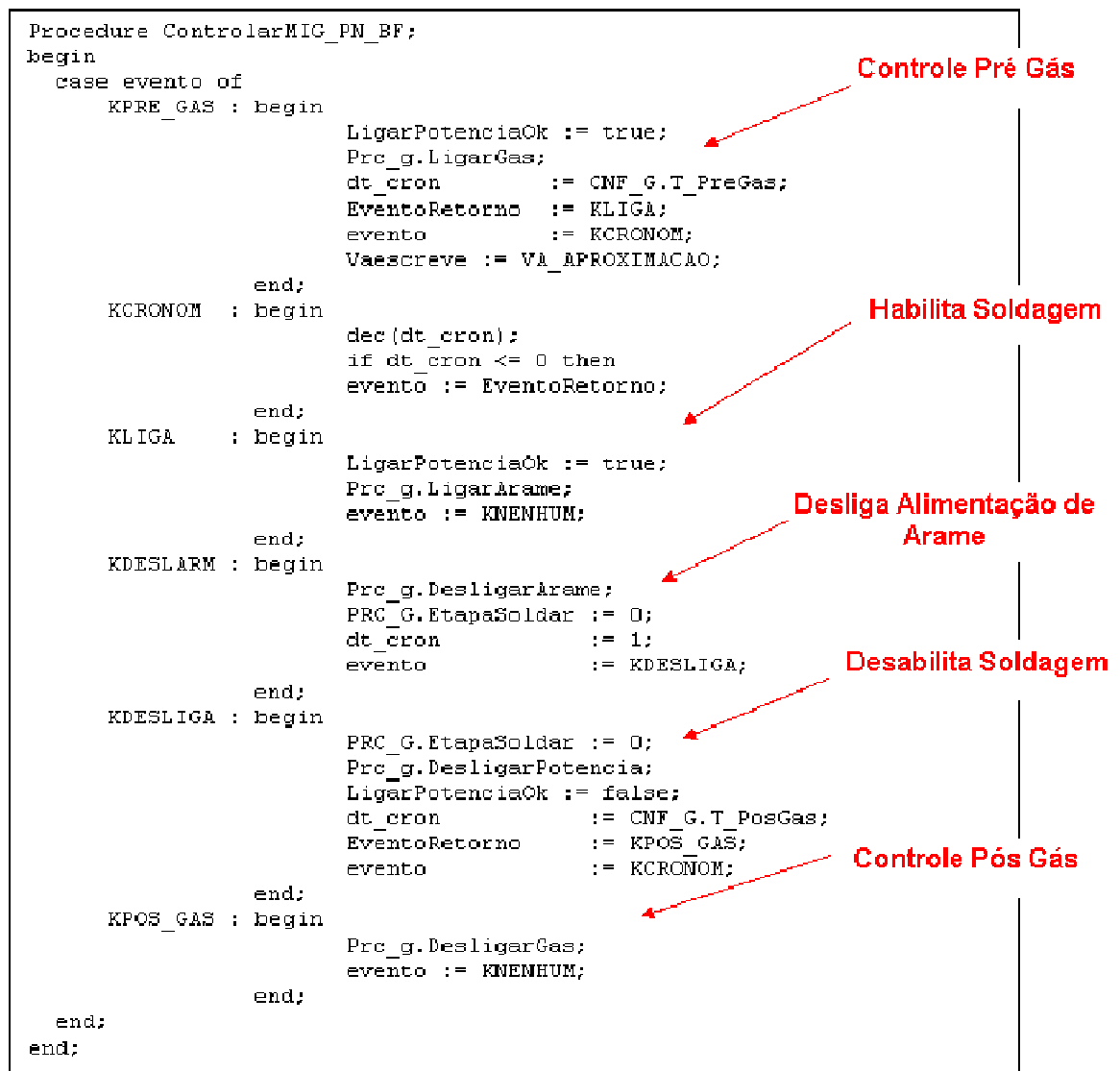


Figura 3.21 – Interrupção de baixa frequência na classe *MIGPN*

3.5.3.3 Interrupção externa (Comunicação serial)

É gerada uma interrupção externa no *SACOSCR* quando há uma tentativa de comunicação proveniente da CPU 1 do SAC. Esta interrupção é interpretada na classe 'Controle' e direciona o fluxo de execução do programa para a rotina de armazenamento das variáveis correspondente ao processo de soldagem em questão. A rotina de armazenamento das variáveis está implementada dentro da

classe do processo correspondente, junto com as demais rotinas de controle da modalidade, conforme visto na Figura 3.22.

```

Procedure IdentificarCmdMig_CVT(cmd,dado_buf:integer);
begin
  case cmd of

    KUREF      : MCVT.Uref  := dado_buf;
    KVA        : MCVT.Va    := dado_buf;
    KKS        : MCVT.Ks    := dado_buf;
    KKD        : MCVT.Kd    := dado_buf;
    SalvaP.KSALV : begin
                    MCVT.processo := PMIG_CVT;
                    Apt           := @MCVT;
                    Erro          := Salvap.salvarProg(Apt,dado_buf);
                  end;
    SalvaP.KLE  : begin
                    Apt           := salvap.LerProg(dado_buf);
                    ApMCVT        := Apt;
                    MCVT          := ApMCVT^;
                  end;
    SalvaP.KTSOLDA : MCVT.TSolda := dado_buf;
  end;
end;

```

Armazenamento de variáveis

Figura 3.22 – Rotina de armazenamento das variáveis da classe *MCVT*

Durante toda a execução da soldagem novos parâmetros podem ser enviados e conseqüentemente armazenados, podendo ser utilizados no laço de controle subsequente ao armazenamento, permitindo desta forma o ajuste em tempo real dos parâmetros do processo.

3.5.4 Placa de aquisição de sinais e controle *Interdata v 3.0*

A placa de tratamento de sinais *Interdata* foi desenvolvida no LABSOLDA no início dos anos noventa para suprir as necessidades de pesquisa e desenvolvimento da época, conforme mencionado no capítulo 2. Atualmente, utiliza-se uma nova versão deste dispositivo chamada *Interdata v 3.0*, Figura 3.23, com inovações

tecnológicas que propiciam um melhor suporte ao controle de dispositivos e aquisição de sinais.

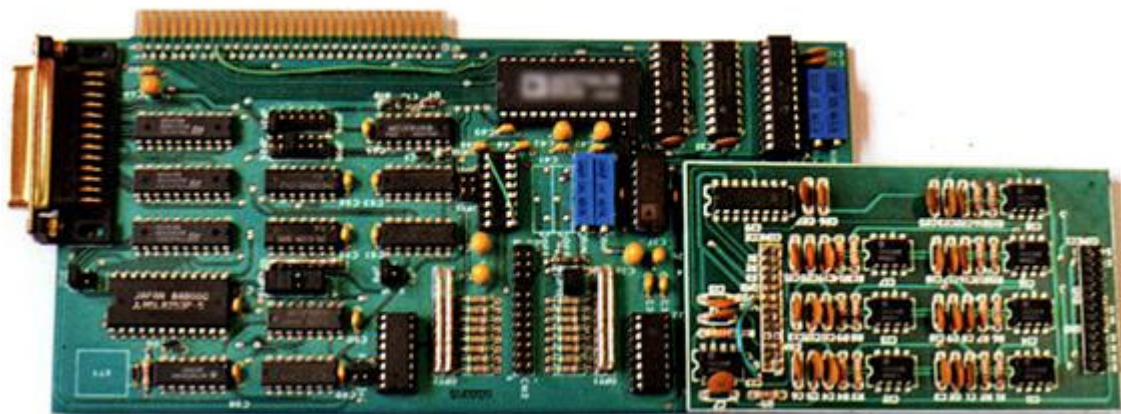


Figura 3.23 – Placa de aquisição e controle Interdata v3.0

A estrutura da placa Interdata v 3.0 apresenta, basicamente, os seguintes dispositivos:

- i Um conversor A/D de 16 canais;
- ii Um conversor D/A de 8 canais;
- iii Um freqüencímetro;
- iv Uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas;

Todos os dispositivos acoplados à *Interdata v 3.0* são configuráveis via software, não sendo necessária, depois de instalada corretamente ao barramento PCI do microcomputador, qualquer intervenção de hardware por parte do usuário.

3.6 Fonte de Soldagem (Entradas Analógicas, Adaptações)

O SAC apresenta a lógica de controle das diferentes modalidades de soldagem embutidas nos softwares desenvolvidos em suas plataformas

microprocessadas, CPU 1 e CPU 2. A fonte de soldagem, no caso do SAC, é o atuador do sistema, ou seja, funciona como fornecedora de energia ao arco, sem responsabilidades sobre o controle dos processos de soldagem. Para tanto, o equipamento de soldagem utilizado no SAC deve ter características especiais que atendam os requisitos do sistema e propiciem o controle total, feito de forma remota, sobre os mais diferentes aspectos dos processos de soldagem.

O equipamento de soldagem utilizado na implementação do SAC foi a fonte Inversal 450, assim como em diversas outras bancadas desenvolvidas no LABSOLDA, capítulo 2.

Por meio de conexões disponíveis no painel frontal do equipamento, apresentado na Figura 3.24, é possível efetuar tanto a leitura das variáveis de soldagem de forma instantânea, bem como efetuar o controle das mesmas em tempo real.



Figura 3.24 – Painel frontal da Inversal 450

Dessa forma, o Sistema Avançado de Controle tem sua configuração analógica de saída na estrutura fornecida pela Inversal 450, isto é, o SAC utiliza os

sinais disponibilizados pela fonte para efetuar o controle dos diferentes processos de soldagem.

No entanto, mesmo com a versatilidade comentada da fonte de soldagem Inversal 450, algumas adaptações foram necessárias para possibilitar a implementação do Sistema Avançado de Controle com todas as atribuições propostas primordialmente.

3.7 Adaptações das entradas analógicas no comando remoto

A fonte de soldagem Inversal 450, quando opera em modo remoto, entra em regime de espera, isto é, aguarda sinais externos, analógicos e digitais, para iniciar o processo de soldagem propriamente dito. No entanto, a forma e a seqüência com que estes sinais externos chegam à fonte de soldagem são fundamentais para o sucesso da operação, devendo ser minuciosamente monitorados pela unidade de comando que esta efetuando o controle do processo.

Fundamentalmente, a Inversal 450 funciona a partir de sinais de tensão utilizados como referência para a corrente de soldagem, tempos de cada etapa, velocidade de arame e assim por diante. Estes sinais, sincronizados pelo hardware da fonte de soldagem, resultam nas diferentes formas de onda referentes a cada processo, apresentada na Figura 3.25.

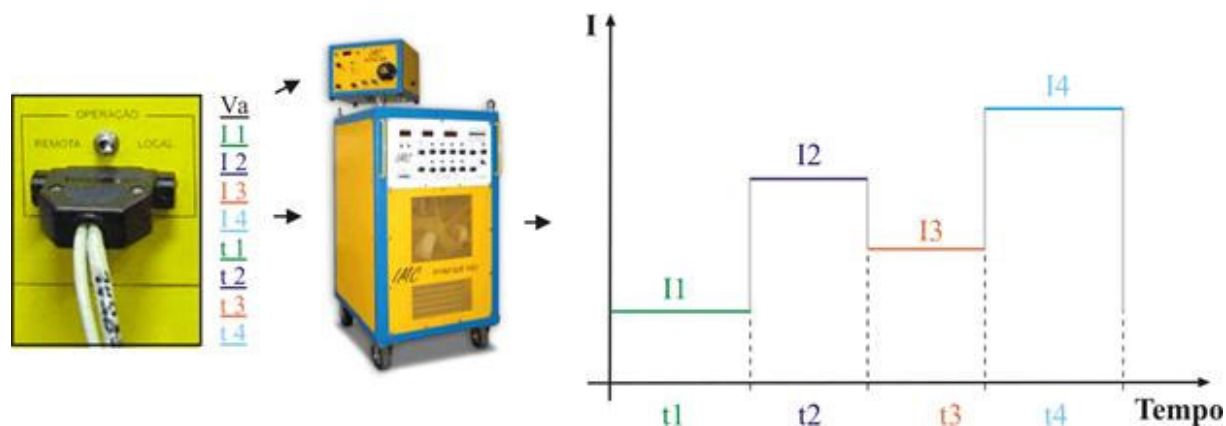


Figura 3.25 - Lógica de funcionamento da Inversal 450

A Inversal 450, fonte de corrente em sua essência independente do processo no qual esteja sendo utilizada - foi projetada em quatro referências distintas, conforme a Figura 3.25. Cada referência de corrente é reproduzida proporcionalmente nos bornes do equipamento em forma seqüencial, sendo temporizadas pelas suas respectivas referências de tempo.

Neste contexto, é necessário obter o total controle dos diferentes processos de soldagem de pelo menos oito canais analógicos para comandar a corrente de soldagem, além do controle da velocidade de arame, feito também por um sinal analógico, e, ainda, outros dispositivos controlados de forma digital. Quando em operação em modo local, estes sinais de referência são gerados internamente pelo equipamento a partir de ajustes no painel da máquina, já em modo remoto estes mesmos sinais devem ser transmitidos por uma fonte externa.

No conector de 25 vias, visualizado no painel da máquina, para comando remoto da Inversal 450, Figura 3.24, encontram-se as entradas analógicas e digitais de cada um dos sinais de referências para o correto funcionamento da fonte de soldagem. As unidades de processamento do SAC, CPU 1 e CPU 2, ficam encarregadas de realizar todas as temporizações necessárias para cada

modalidade. Dessa forma, a *Interdata v 3.0* disponibiliza apenas dois canais de controle analógico para a fonte de soldagem, o sinal de corrente de referência e a velocidade de arame de referência.

Para adaptar tal característica de concepção do SAC à fonte de soldagem Inversal 450, as entradas analógicas correspondentes às quatro diferentes referências de corrente foram curto-circuitadas, conforme a

Figura 3.26, viabilizando apenas um ponto para a conexão do sinal analógico de comando de corrente proveniente da *Interdata v 3.0*. Assim, os conversores internos da Inversal 450, independentes dos sinais advindos das referências de tempo, enxergam um único sinal de referência para a corrente, construindo a forma de onda de saída a partir do comando vindo da CPU 2. As conexões correspondentes as entradas analógicas para o comando dos tempos permanecem em circuito aberto, já que não influenciam o controle sobre o processo de soldagem.

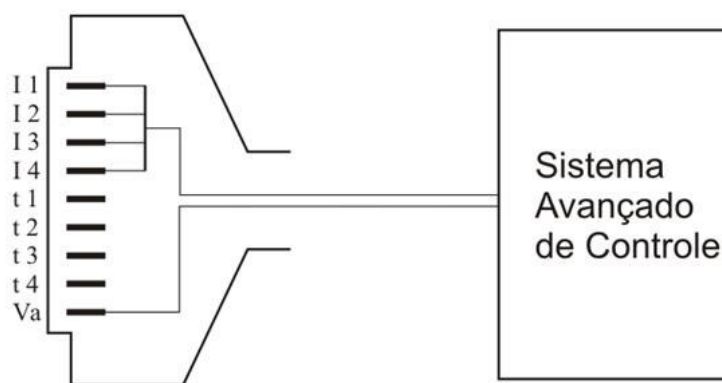


Figura 3.26 – Adaptação do conector de comando remoto do SAC

Além do sinal de referência de corrente, há, também, as conexões para a referência de velocidade de avanço do arame, de acordo com os sinais digitais de

controles auxiliares do processo, como 'Habilita Potencia', 'Bomba de água', entre outros.

3.8 Adaptação do Cabeçote alimentador de arame

A fonte de soldagem Inversal 450, em sua concepção original, apresenta um dispositivo de alimentação de arame, o *STA-20*, também desenvolvido no LABSOLDA e compatível com as configurações da fonte em questão.

O *STA-20*, quando projetado, foi concebido para dar também à alimentação de arame dos diferentes processos de soldagem que por ventura venham a utilizá-la, a versatilidade na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à soldagem. Para isso, junto ao seu projeto, aliaram-se características de aceleração, desaceleração e também a possibilidade de controle externo, isto é, o *STA-20* é capaz de controlar a velocidade de arame com intuito de se manter a tensão média do arco constante, o que implica, na soldagem MIG/MAG, em se ter o comprimento do arco rígido durante todo o cordão.

Porém, todas as características especiais do *STA-20* são disponibilizadas somente quando a Inversal 450 está operando em modo local, o que inviabiliza a utilização destas propriedades pelo Sistema Avançado de Controle. Por meio do SAC, é possível apenas comandar a velocidade de alimentação arame por um sinal de tensão imposto em uma das entradas analógicas do conector de modo remoto do equipamento. Qualquer tipo de controle desta variável, portanto, deve partir das unidades de processamento do sistema.

O controle sobre a velocidade de alimentação de arame nos processos de soldagem que utilizam este tipo de recurso, apesar de lento devido a constante de

tempo elevada dos motores utilizados, vêm demonstrando bastante relevância no desenvolvimento de técnicas diferenciadas para abertura de arco e controle sobre a altura do mesmo. Neste sentido, flexibilizar o sistema quanto ao controle da velocidade de alimentação de arame é essencial para os avanços tecnológico vislumbrados com o SAC.

O *STA-20* permite, por meio do acesso remoto do equipamento, um nível de controle bastante elevado sobre a velocidade de alimentação do arame, além de respostas dinâmicas boas quando comparados à equipamentos comerciais. Porém, o *STA-20*, como a grande maioria dos equipamentos comerciais similares, permite a alimentação de arame de forma unidirecional, isto é, não disponibiliza o retrocesso do arame. Apesar de pouco convencional, técnicas de controle sobre procedimentos de aberturas de arco vêm sendo utilizadas para este tipo de artifício a fim de obter baixos aportes térmicos nos momentos iniciais do cordão, possibilitando ignições de arco suaves, bastante conveniente em aplicações com chapas de pouca espessura.

Dessa maneira, adaptou-se o cabeçote de alimentação, *STA-20*, para permitir o retrocesso do arame a partir do comando de uma saída digital da *Interdata v 3.0*. Para tanto, inicialmente, acoplou-se ao *STA-20* um relé de contatos reversíveis, que conectado aos bornes do motor de tracionamento, possibilita a inversão da tensão imposta no mesmo, viabilizando a rotação em sentido contrário ao convencional, conforme Figura 3.27.

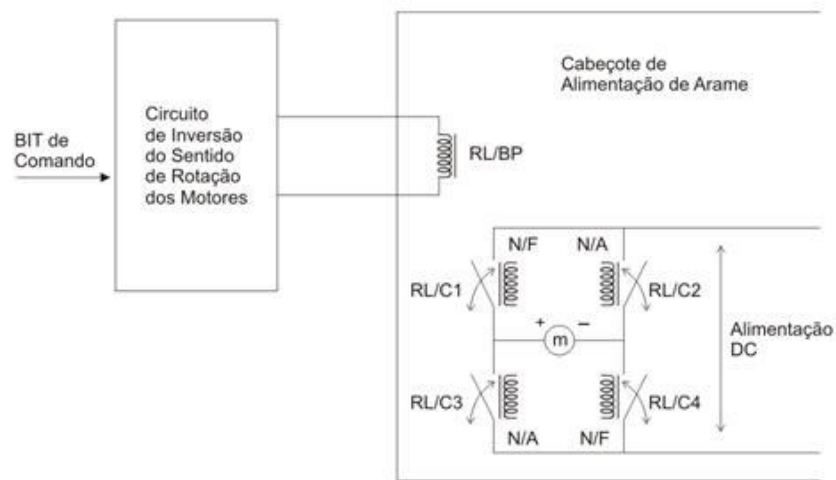


Figura 3.27 – Esquemático de adaptação do cabeçote STA-20

Além da adaptação do relé de contatos reversíveis ao STA-20, desenvolveu-se um circuito de acionamento da bobina principal do relé, ordenado a partir de um *bit* de comando transmitido pela placa *Interdata v 3.0*, observado na Figura 3.28.

O circuito consiste em relés e transistores que interpretam o sinal vindo da CPU 2 e magnetizam a bobina primária do relé, *RL/BP*, fazendo a inversão dos contatos secundários do mesmo, que por sua vez, causa a troca da rotação do motor do cabeçote de alimentação de arame.

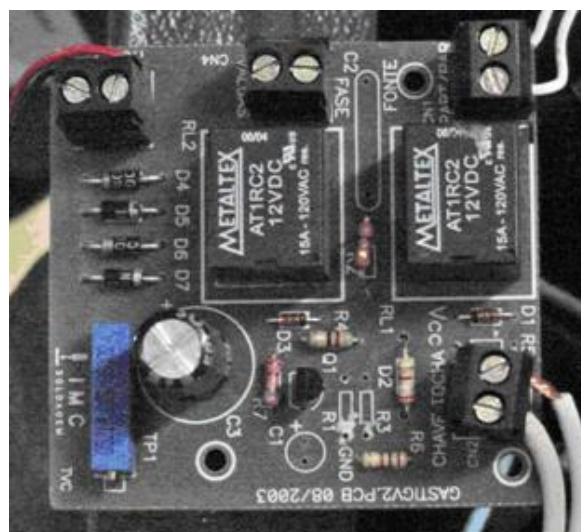


Figura 3.28 – Circuito de acionamento do sentido de tração dos motores

3.9 Melhoramentos no circuito de reignição de arco da Inversal 450

Conforme já mencionado, uma das características fundamentais da fonte de soldagem Inversal 450 é a possibilidade de soldagem em ambas as polaridades, direta para as modalidades TIG, Eletrodo Revestido e Plasma e “inversa” para o processo MIG/MAG. Com intuito de promover uma flexibilização do equipamento em maior escala, inseriu-se, ainda, a possibilidade da soldagem por meio de corrente alternada, isto é, a inversão constante da polaridade do equipamento durante o processo, tecnologia bastante utilizada na modalidade TIG para a soldagem de alumínio e suas ligas.

Entretanto, a inversão de polaridade durante o processo, apesar de fundamental para a viabilidade da soldagem de alguns materiais, traz consigo certas inconveniências, que o equipamento de soldagem, no caso a Inversal 450, deve estar apto a resolver. O ponto crítico da estabilidade dos processos que empregam a corrente alternada é o seu transitório por zero, ou seja, o momento da inversão de polaridade. Incondicionalmente, a passagem por zero da corrente causa o apagamento momentâneo do arco voltaico, o que, em algumas situações, pode ocasionar a extinção definitiva do mesmo e a inviabilidade do processo.

A facilidade no reacendimento do arco voltaico depende, essencialmente, das características de cada modalidade. A soldagem por meio de eletrodos revestidos não apresenta, em geral, dificuldades na manutenção do arco voltaico quando se utiliza corrente alternada, devido, principalmente, às altas temperaturas envolvidas, tanto na ponta do eletrodo quanto na poça metálica. Porém, a soldagem TIG AC caracteriza-se por algumas dificuldades no transitório da corrente, principalmente, na passagem da polaridade direta para a inversa, necessitando de dispositivos de

reignição de circuitos auxiliares para a manutenção do arco em eventuais apagamentos.

Os equipamentos capazes de reproduzir a soldagem por meio de corrente alternada, em geral, são dotados de circuitos auxiliares para a reignição do arco voltaico nos eventuais apagamentos. Estes circuitos detectam o transitório da corrente e geram um pulso de alta tensão em um curto intervalo de tempo, buscando ionizar a atmosfera gasosa e possibilitar o reacendimento do arco voltaico.

A Inversal 450, originalmente, apresenta um circuito auxiliar denominado *circuito de pulso*, observado na Figura 3.29, que proporciona o reacendimento do arco no caso de eventuais apagamentos. Porém, este circuito foi projetado para proporcionar a reignição do arco na modalidade TIG, que apesar de apresentar dificuldades maiores para manutenção do arco que os eletrodos revestidos, ainda permite o reacendimento do mesmo com baixos níveis de energia, já que as temperaturas alcançadas pelo eletrodo de tungstênio durante o processo são bastante elevadas, mantendo a emissividade do eletrodo em níveis propensos a reignição do arco.

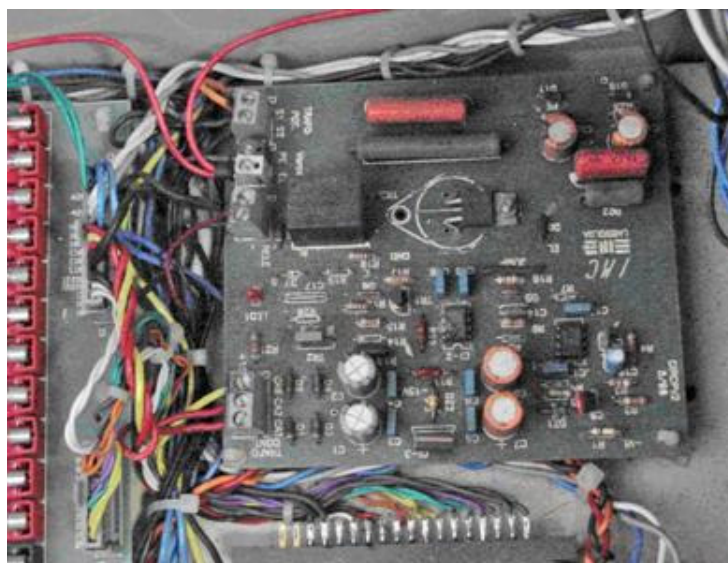


Figura 3.29 – Circuito de Pulso

O Sistema Avançado de Controle, por meio de suas ferramentas de desenho, a princípio, viabiliza a implementação de formas de onda de corrente para qualquer processo de soldagem. Este fato cria a oportunidade do emprego da corrente alternada em processos de soldagem onde esta tecnologia é pouco empregada ou ainda está em fase de estudo, fazendo que, em determinados casos, os problemas com extinções de arco se agravem.

Neste sentido, adaptou-se o *circuito de pulso* utilizado na Inversal 450, para impor maiores níveis de energia no momento da extinção do arco, sendo possível executar a reignição do mesmo em modalidades como MIG/MAG AC, por exemplo, objeto de pesquisas recentes tanto no LABSOLDA, como em outras instituições.

A estrutura básica do circuito de pulso é ilustrada na Figura 3.30. Por meio de um sensor de corrente, o circuito *detector de zero* gera um pulso em sua saída colocando em condução a chave semicondutora 'S' a cada transitório da corrente. Quando a mesma chave 'S' se bloqueia, toda a energia armazenada na indutância de saída da Inversal 450, 'L', se transfere para o capacitor acoplado em paralelo com a saída da fonte 'C', que deve ser dimensionado para que induza uma tensão entre seus terminais suficiente para que haja a reignição do arco voltaico.

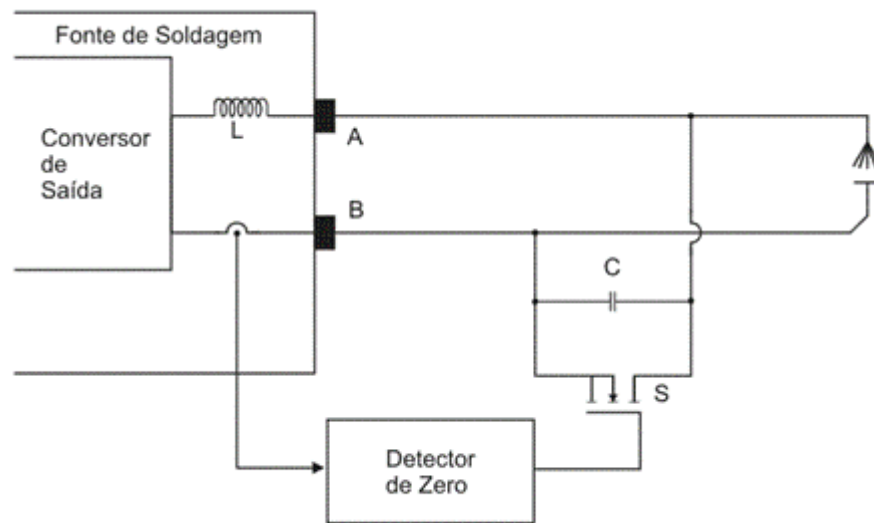


Figura 3.30 - Esquemático do circuito de pulso

Não houve adaptações na estrutura primária do *circuito de pulso*, no entanto, um redimensionamento de alguns componentes foi necessário para que a tensão induzida nos terminais da Inversal 450 fosse capaz de reignitar o arco voltaico mesmo em condições adversas, como nos momentos iniciais de um cordão, em que a superfície a ser soldada se encontra com temperaturas amenas, prejudicando a emissividade, tanto de metal de base quanto do eletrodo.

$$V = I \times \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Equação 3.1 - Tensão induzida nos bornes da fonte de soldagem

A Equação 3.1 é resultado do balanço de energia feito para os componentes de saída da Inversal 450 no momento da reignição do arco. Na equação, 'V' é a tensão induzida nos terminais da fonte, 'L' e 'C' são os valores nominais dos

componentes ilustrados na Figura 3.30 e ' I ' é a corrente que circula pela saída do equipamento no momento que a chave ' S ' está conduzindo.

Considerando que os valores de ' L ', indutância de saída da fonte de soldagem, e ' I ', corrente que circula pela chave ' S ', não podem ser alterados por demandarem alterações significativas no projeto do equipamento, fica-se apenas com a possibilidade de alteração do capacitor ' C ', para que se possa mexer na amplitude da tensão gerada nos terminais da Inversal 450.

Devido ao curto intervalo de tempo em que ocorre o pulso de tensão nos bornes da Inversal 450, bem como a elevada amplitude que este pulso alcança, medi-lo, por meio de equipamentos eletrônicos convencionais, tais como osciloscópios de bancada, torna-se praticamente inviável, sob pena de possíveis danos nos instrumentos de medida. Porém, estima-se, por meio das equações, que a tensão alcançada nos bornes da Inversal 450 após o redimensionamento da capacitância ' C ', no momento da reignição do arco, pode chegar até à 600 V, em um intervalo de pelo menos 10 μ s.

CAPITULO 4

APLICAÇÕES DO SISTEMA AVANÇADO DE CONTROLE

4.1 Introdução

A versatilidade atribuída ao Sistema Avançado de Controle faz com que aplicações do mesmo sejam encontradas em quase todas as áreas de atuação do LABSOLDA. A flexibilidade do SAC permite alterações substanciais nos princípios de funcionamento dos diferentes processos de soldagem que o sistema está apto a gerenciar. A intervenção simples, por meio de desenhos de formas de onda ou até mesmo implementação de linhas de código de programa, viabiliza a manipulação rápida das lógicas de controle dos processos, permitindo a avaliação do comportamento das modalidades em análise sob os mais diversos aspectos.

Dentre as diferentes modalidades de soldagem que o Sistema Avançado de Controle está pronto a comandar, o processo MIG/MAG se apresenta como foco de diversos estudos científicos, tanto no LABSOLDA, quanto em outras instituições de ensino e pesquisa. O seu reconhecido potencial no mercado de fabricação atual faz com que o comportamento do processo supracitado seja amplamente avaliado, e seus princípios de funcionamento e lógicas de controle estejam em contínua evolução. O SAC, devido a sua versátil configuração, surge como uma ferramenta capaz de dar a infra-estrutura necessária ao estudo mais detalhado do processo de soldagem, possibilitando a prática de conjecturas sobre a modalidade MIG/MAG anteriormente impedidas pelas barreiras tecnológicas.

Buscou-se, nesta etapa do trabalho, desenvolver alguns métodos de estabilização do processo MIG/MAG, utilizando o SAC como ferramenta de apoio primordial para tais avanços. Neste capítulo, apresentam-se soluções alternativas para o procedimento de abertura de arco da modalidade em questão, bem como para a manutenção comprimento do mesmo durante o regime permanente. Ambos os aspectos, são de amplo conhecimento do meio científico, entretanto, a proposta de soluções para tais problemáticas ainda são tímidas e pouco empregadas em equipamentos comerciais.

4.2 Novas técnicas de estabilização do processo MIG/MAG

O processo MIG/MAG apresenta basicamente em três configurações do ponto de vista do controle da fonte de soldagem. A modalidade MIG/MAG *convencional*, conhecida por ter comando de tensão, ou seja, a fonte de soldagem controla um patamar de tensão, ajustado pelo operador, entre os bornes do equipamento durante a execução do cordão de solda. A modalidade MIG/MAG por *comando de corrente*, ou seja, a fonte de soldagem controla níveis de corrente em sua saída, também ajustados pelo operador. E por último, a modalidade MIG/MAG *modo misto*, que faz uma mescla dos dois processos anteriores, comandando corrente e tensão em fases distintas do processo.

Dentre as variações do processo MIG/MAG, a modalidade que conta com o comando de corrente é a que apresenta os maiores problemas no quesito estabilidade do arco. Este fato decorre das condições que a fonte de soldagem impõe ao arco voltaico, ou seja, a determinação de um valor de corrente não define propriamente um comprimento de arco. Esta altura é uma consequência do

equilíbrio entre o valor médio desta corrente e a velocidade de alimentação de arame-eletrodo.

Esta problemática, nas modalidades *convencional* e *modo misto* do processo MIG/MAG, é absorvida pelo fato de que o ajuste de tensão indiretamente pré-define um comprimento de arco, mesmo que este, sob vários aspectos, ainda dependa do equilíbrio de alguns parâmetros do processo. O que se observa é uma maior rigidez do arco nas modalidades que contam com ajuste de tensão e consequentemente uma maior estabilidade do processo durante o regime permanente. A Figura 4.1 ilustra um comparativo entre o comando de tensão e o comando de corrente para o processo MIG/MAG.



Figura 4.1 – Comparativo do processo MIG/MAG

Diante das instabilidades encontradas na modalidade MIG/MAG por imposição de corrente, desenvolveu-se uma série de técnicas que visam, em primeiro plano, oferecer melhores condições de estabilidade para o processo em regime permanente, ou seja, tornar a modalidade menos sensível a transitórios durante o cordão. Para tanto, se faz necessário atentar-se, também, para o início do processo, ou seja, a abertura do arco, que na modalidade de soldagem em questão, apresenta-se como um período bastante turbulento, fato advindo do emprego de

elevados aportes térmicos, o que ocasiona, em boa parte dos casos, instabilidades que adentram o regime permanente.

Neste contexto, iniciaram-se os estudos sobre a estabilidade da modalidade de soldagem acima citada, propondo novos conceitos de abertura de arco que promovam a ignição do mesmo de uma forma suave, facilitando a estabilização do processo desde seus primeiros momentos. E, em seguida, desenvolveram-se métodos de controle de altura de arco, promovendo a manutenção do comprimento do mesmo por meio de ajustes em tempo real dos parâmetros do processo. Tenta-se, dessa forma, tornar o processo mais robusto, ampliando ainda mais o campo de aplicação da modalidade MIG/MAG por comando de corrente.

4.3 Novo método de abertura de arco

Experimentalmente, a ignição do arco voltaico apresenta como um dos períodos mais críticos para a modalidade MIG/MAG, pois o metal de base e o arame-eletrodo ainda estão em baixas temperaturas, o que dificulta sua característica de emissividade e por conseqüência, torna o processo susceptível a instabilidades.

No processo MIG/MAG *convencional*, com imposição de tensão durante a soldagem, tem-se a abertura do arco sendo realizada de forma natural, ou seja, como conseqüência de um curto-circuito estabelecido entre bico de contato e metal de base, fazendo com que os níveis de corrente se elevem até proporcionarem a fusão do arame-eletrodo e a posterior ignição do arco voltaico, conforme a Figura 4.2.

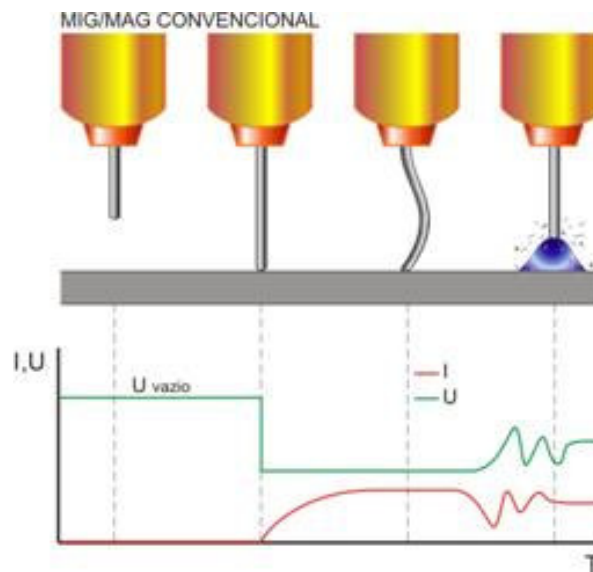


Figura 4.2 – Abertura de arco no processo MIG/MAG *convencional*

Entretanto, a soldagem MIG/MAG por comando de corrente apresenta um comportamento diferenciado no procedimento de abertura de arco do processo. Sem qualquer espécie de adaptação no equipamento de soldagem, quando se estabelece um curto-circuito entre bico de contato e metal de base, a fonte de energia impõe entre seus bornes a corrente selecionada e executa a operação de soldagem. Porém, os níveis de corrente exigidos para ignição do arco voltaico são superiores aos de regime permanente do processo observa-se esse fenômeno na Figura 4.3, que ilustra oscilogramas de aberturas de arco executados no processo MIG/MAG.

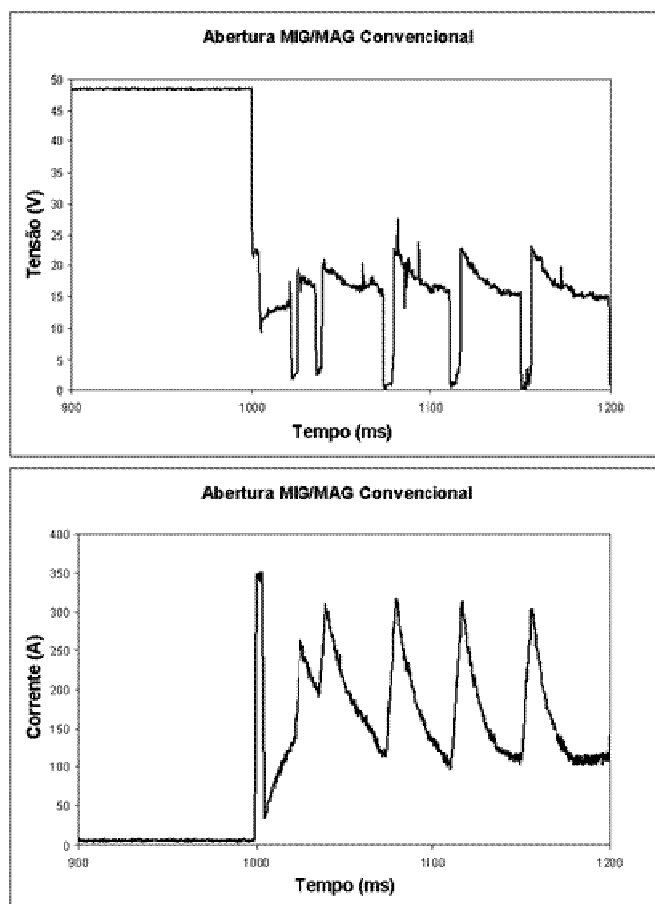


Figura 4.3 – Oscilogramas de abertura do arco no processo MIG/MAG
convencional

Devido às baixas temperaturas envolvidas nos momentos iniciais do processo, correntes elevadas são necessárias para que ocorra a ionização da atmosfera gasosa e o aquecimento do arame-eletrodo e metal de base. Para tanto, equipamentos de soldagem que permitem a utilização de comando de corrente para o processo MIG/MAG são dotados de circuitos de controle que detectam o curto-circuito entre bico de contato e peça, propiciando a imposição de elevados níveis de corrente nestes momentos. Após a detecção da abertura efetiva do arco, volta-se aos valores de corrente de regime do processo, dando continuidade ao cordão, conforme observado na Figura 4.4.

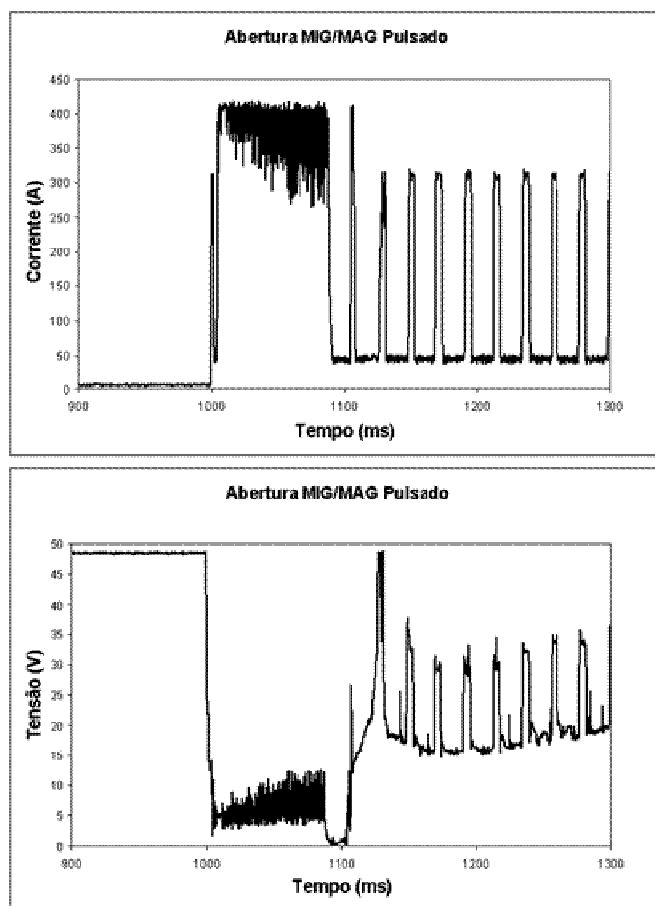


Figura 4.4 – Oscilogramas de abertura de arco no processo MIG/MAG por *comando de corrente*

No entanto, a abertura do arco voltaico, feita como descrito anteriormente, com elevados aportes térmicos, *hot start*, se apresenta de uma forma bastante turbulenta e explosiva, já que níveis elevados de correntes são impostos em pequenas seções de metal, fazendo com que, na maior parte dos casos, este tipo de abertura gere instabilidades nos momentos iniciais do processo.

A utilização da metodologia de abertura *hot start* é aplicada com restrições em chapas de pouca espessura. O excesso de calor gerado em uma pequena área do material pode perfurá-lo, impedindo o prosseguimento do cordão e danificando a peça a ser soldada. Outra notória restrição da abertura do arco feita de forma

explosiva é a aplicação em soldas de acabamento, a qual necessita de condições estéticas favoráveis. O elevado aporte térmico e a turbulência da abertura geram irregularidades no início do cordão, o que nem sempre é tolerável.

Na busca da redução dos aportes térmicos envolvidos na abertura do arco pelo método *hot start*, desenvolveu-se um procedimento baseado em baixos níveis de energia, em que nos momentos iniciais do processo os valores de corrente utilizados são relativamente baixos. Dessa forma, busca-se, na soldagem MIG/MAG, uma ignição de arco feita de forma suave e com relativo controle sobre a mesma, com intuito de obter repetitividade e iniciar o cordão de solda com uma relativa estabilidade sobre o arco. A Figura 4.5 ilustra a seqüência das etapas propostas neste trabalho para o procedimento de abertura suave do arco no processo MIG/MAG.

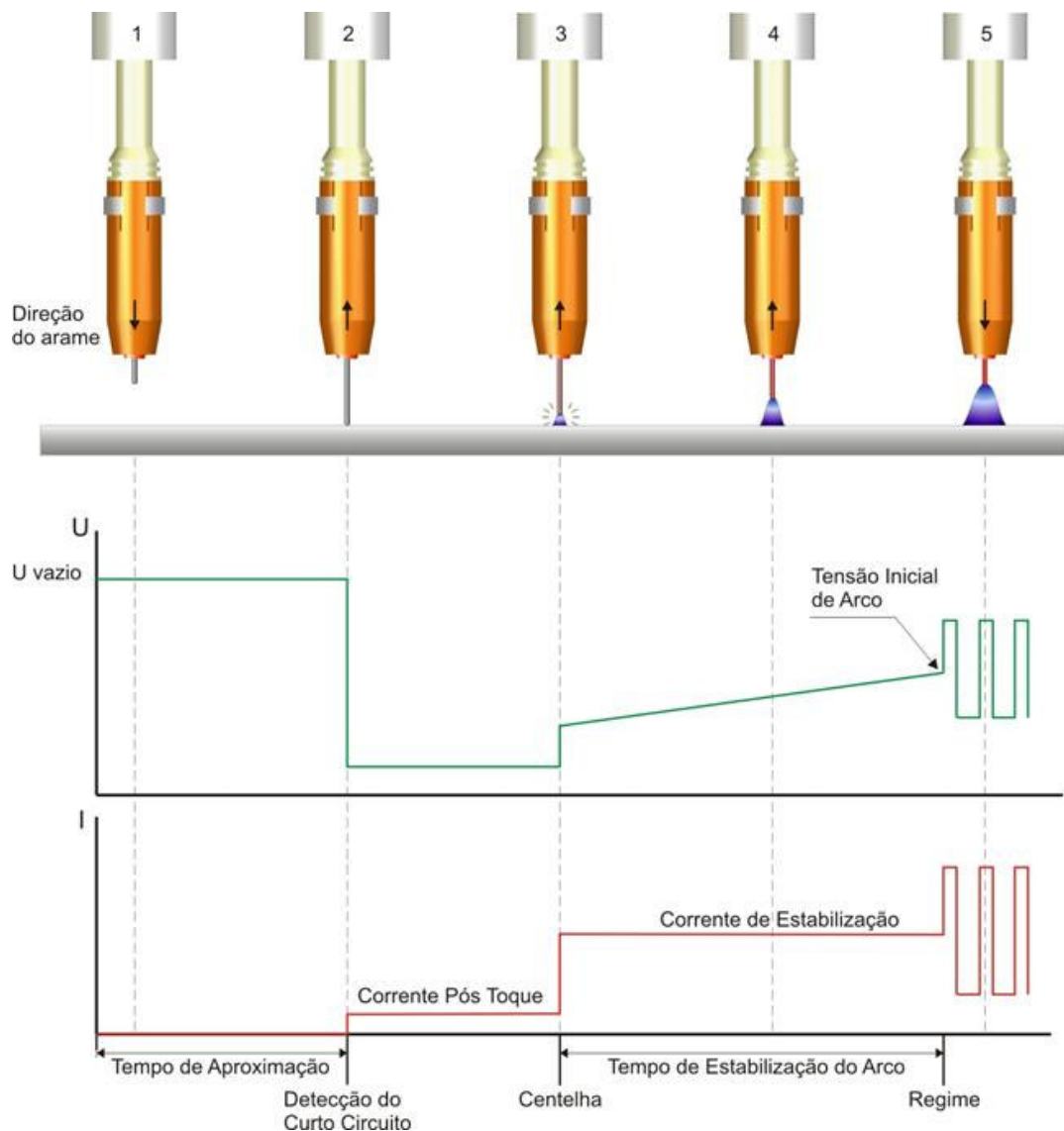


Figura 4.5 - Etapas do procedimento de abertura suave de arco

4.3.1 Etapas do procedimento de abertura de arco

O procedimento proposto para ignição de arco de forma suave é composto por uma sucessão de três etapas: aproximação do arame-eletrodo da peça a ser soldada; detecção do curto-circuito e inversão do sentido de alimentação de arame-eletrodo e a estabilização inicial do arco voltaico, descritas a seguir.

4.3.1.1 Etapa de aproximação do arame-eletrodo

Uma das principais causas da aleatoriedade da abertura de arco no processo MIG/MAG por comando de corrente é a flambagem do arame-eletrodo no momento que o mesmo entra em contato com o metal de base [8]. Este fato advém da elevada velocidade de alimentação de arame no momento da abertura do arco, já que nos momentos iniciais do processo os tracionadores de arame-eletrodo impõe a velocidade de regime permanente ajustada pelo operador, fazendo com que haja o choque violento entre metal de adição e de base.

Utilizando o SAC, em sua plataforma MS-DOS, implementou-se uma rotina de controle que detecta a inexistência de corrente circulante pelo circuito da fonte de soldagem e interpreta esta informação como uma extinção de arco, impondo aos tracionadores uma velocidade de alimentação de arame-eletrodo relativamente baixa, *Velocidade de Aproximação* (V_{a_prox}), se comparada aos valores de regime permanente, conforme identificado na Figura 4.6.

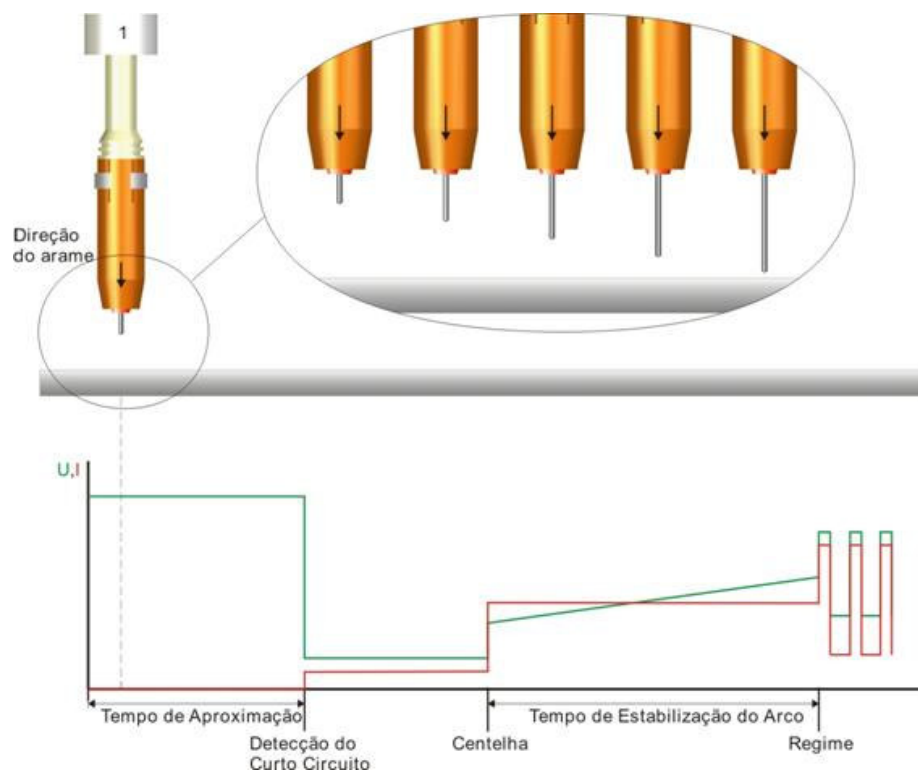


Figura 4.6 – Etapa de aproximação do arame-eletrodo

A rotina de controle estruturada no SAC deixa o sistema em modo de espera durante a aproximação do arame-eletrodo à peça, isto é, enquanto não se estabelecer o curto-circuito, os tracionadores continuam impondo a Va_{prox} .

4.3.1.2 Detecção do curto circuito

O estabelecimento do curto-circuito entre arame-eletrodo e a peça a ser soldada é percebido pelos conversores do SAC por meio da leitura da tensão entre os bornes da fonte de soldagem. A detecção do curto-circuito faz com que o software de controle desenvolvido para este procedimento de abertura seja direcionado para a rotina responsável pela ignição do processo.

Imediatamente após a identificação do contato entre arame-eletrodo e metal de base, o SAC comanda a circulação de corrente por meio do circuito da fonte de soldagem. A corrente imposta ao processo neste momento é bastante reduzida, *corrente de pós-toque* (I_{pos}), já que o intuito de sua existência não é o de ignição imediata do arco por meio da fusão do arame-eletrodo e, sim, de magnetizar a indutância de saída do equipamento de soldagem, conforme Figura 4.7.

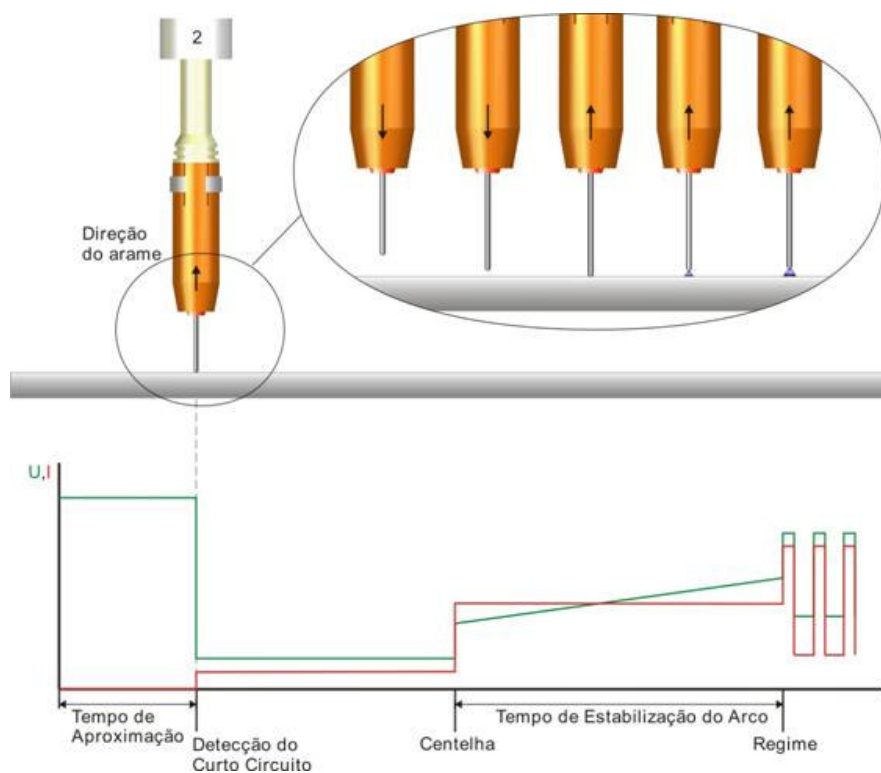


Figura 4.7 - Etapa de detecção do curto-circuito

Assim que o software de controle impor a I_{pos} ao circuito de saída fonte de soldagem, a rotina programada no SAC comanda a imediata reversão no sentido de rotação dos tracionadores de arame-eletrodo. Devido à baixa velocidade utilizada na aproximação do arame-eletrodo, Va_{prox} , o retorno do mesmo e a conseqüente

abertura do curto-circuito estabelecido ocorrem de maneira bastante suave, amenizando significativamente os problemas de flambagem citados.

No momento em que a rotina de controle do SAC comanda o retorno do arame-eletrodo, o curto-circuito entre o mesmo e metal de base é desfeito, provocando a abertura do circuito elétrico formado nos bornes da fonte de soldagem. A impossibilidade de circulação de corrente elétrica pelo circuito faz com que a indutância de saída da fonte reaja e gere uma sobre-tensão entre seus terminais, comportamento característico deste componente, Equação 4.1.

$$V_L = L \times \frac{di}{dt}$$

Equação 4.1 – Tensão sobre o indutor

A prévia magnetização da indutância de saída da fonte de soldagem é fundamental nesta etapa e, conseqüentemente, no procedimento de abertura como um todo. A energia armazenada no indutor, estabelecida a partir da circulação da *I_{pos}*, age como uma espécie de ignitor de arco neste instante. Devido à necessidade de descarga da energia armazenada no campo magnético da indutância, ocorre a ruptura do dielétrico da atmosfera gasosa, provocando o surgimento de uma espécie de centelha entre a ponta do arame-eletrodo e a peça a ser soldada, observado na Figura 4.8.

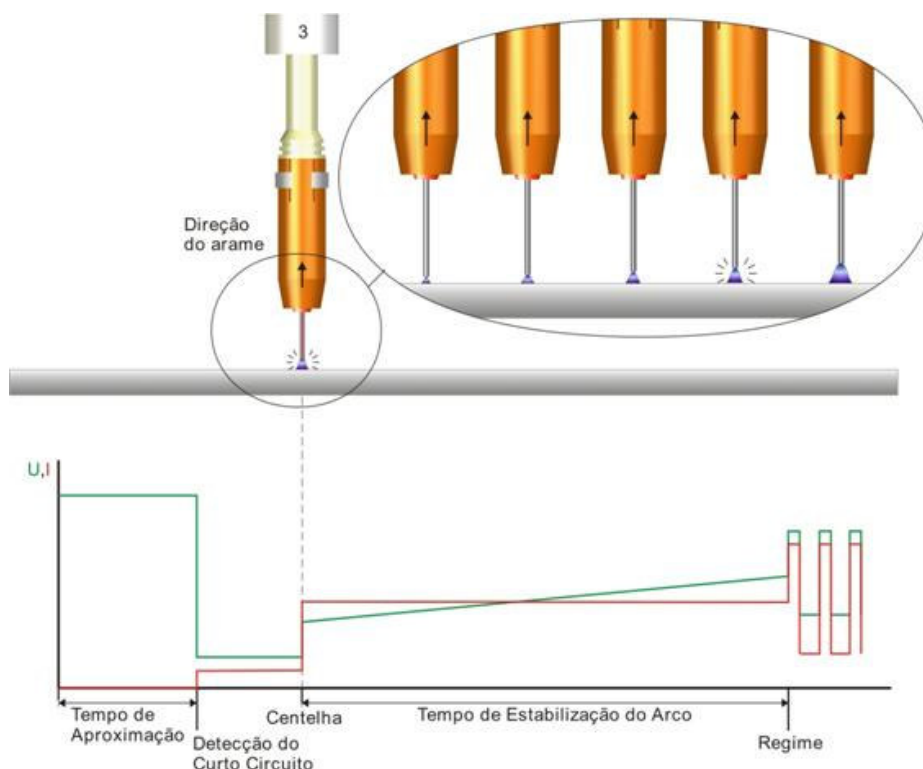


Figura 4.8 - Etapa de retorno do arame-eletrodo

O surgimento desta centelha é monitorado pelos conversores do SAC, que lêem a tensão entre os bornes do equipamento durante toda esta etapa. A rotina implementada para o controle do procedimento de abertura interpreta os valores obtidos da aquisição de tensão para afirmar sobre as condições do arco neste momento. Caso não haja o surgimento de uma centelha, independente do motivo, os conversores do SAC detectam a extinção de arco proveniente dos elevados valores de tensão lidos e um novo procedimento de abertura é iniciado.

No entanto, se a aquisição da tensão, imediatamente após todo o procedimento de retorno de arame-eletrodo, apontar para valores intermediários, isto é, superiores às tensões que caracterizam curto-circuito e inferiores a tensão que caracterizam extinção de arco, o software de controle considera como uma tentativa

válida de ignição e passa para etapa de estabilização inicial do arco voltaico. As faixas de tensões interpretadas pelo SAC para validar a abertura do arco é apresentada na Figura 4.9.




Tensão Lida nos Conversores	Interpretação no Sistema Avançado(SAC)
35V - 50V	Arco Extinto 
8V - 35V	Arco Aberto 
0V - 8V	Curto-Circuito 

Figura 4.9 – Faixas de tensão interpretadas pelo software de controle

4.3.1.3 Etapa de estabilização

Com uma tentativa de abertura de arco válida, o software é direcionado para a etapa de estabilização inicial. Esta etapa consiste em viabilizar as condições iniciais do arco para que entre em regime permanente de forma estável e com um comprimento de arco satisfatório.

O surgimento da centelha entre arame-eletrodo e metal de base pode ser considerado como a ignição do arco propriamente dita. No entanto, cabe a ressalva de que, este fenômeno é fruto de uma descarga elétrica proveniente da indutância de saída da fonte de soldagem e a corrente circulante, neste instante, não é

suficiente para aquecer a região, não oferecendo condições satisfatórias para o estabelecimento definitivo do arco voltaico.

Além dos problemas térmicos, no momento que ocorre a centelha, a distância entre o arame-eletrodo e o metal de base é bastante reduzida, o que implica em dificuldades de estabelecer a velocidade de alimentação de arame de regime, sob pena de haver um subsequente curto-circuito, identificado na Figura 4.10.

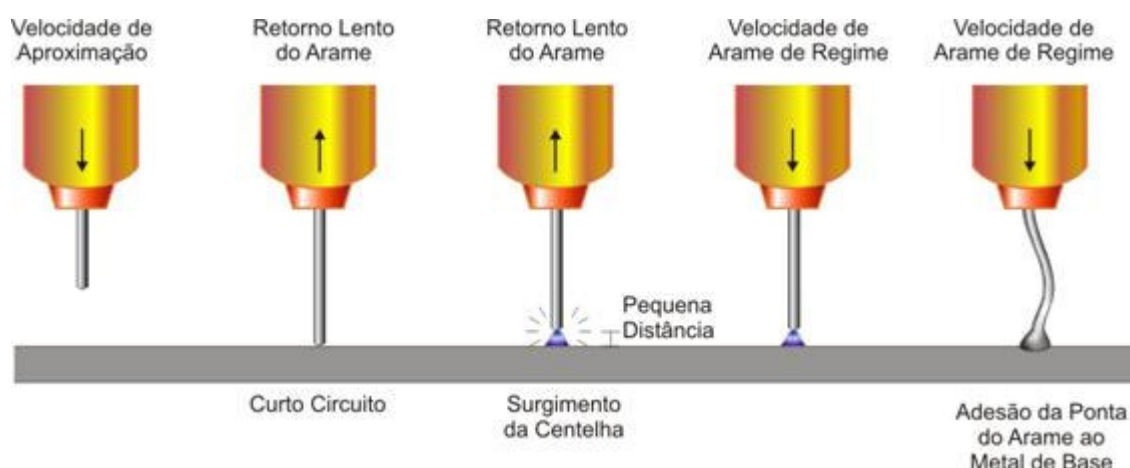


Figura 4.10 – Problemas com a pequena distância entre arame-eletrodo e metal de base após o surgimento da centelha

Para contornar esta problemática inicial, o software de controle, logo que detecta a centelha, impõem à saída da fonte de soldagem valores de correntes mais elevados que os até então utilizados e mantém o retrocesso do arame-eletrodo, propiciando, dessa maneira, o aquecimento da região na qual é iniciado o cordão, e, também, o aumento do comprimento do arco voltaico, conforme a Figura 4.11.

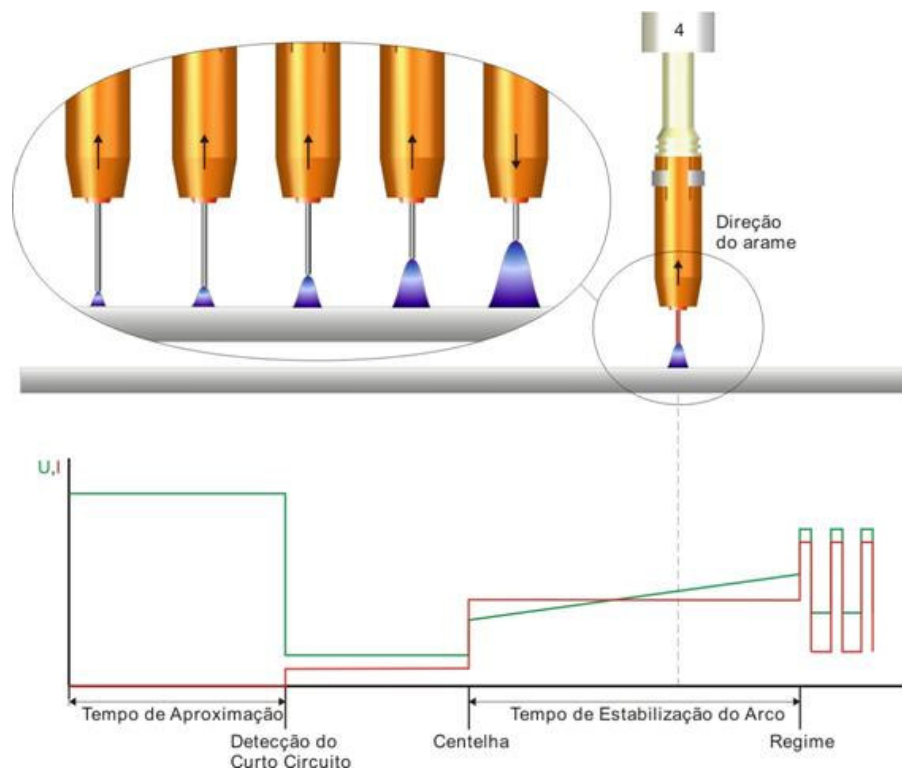


Figura 4.11 – Etapa de estabilização do arco voltaico

O SAC mantém o processo de soldagem na etapa de estabilização do arco durante um determinado intervalo tempo ajustado no próprio software, *Tempo de estabilização* (Testab), e a partir de então inicia o regime permanente.

Concluída esta etapa, o procedimento de abertura é finalizado e o SAC impõe a fonte de soldagem os valores de regime permanente para o processo. Durante todo o regime permanente as rotinas de controle programadas no SAC monitoram as condições de manutenção do arco, detectando extinções ou eventuais curtos-circuitos. Dessa maneira, o programa implementado é capaz de gerar um novo procedimento de abertura mesmo quando o processo já se encontra em regime, ficando imune às instabilidades de eventuais novas ignições. O fluxograma da Figura 4.12 ilustra as etapas do procedimento de abertura.

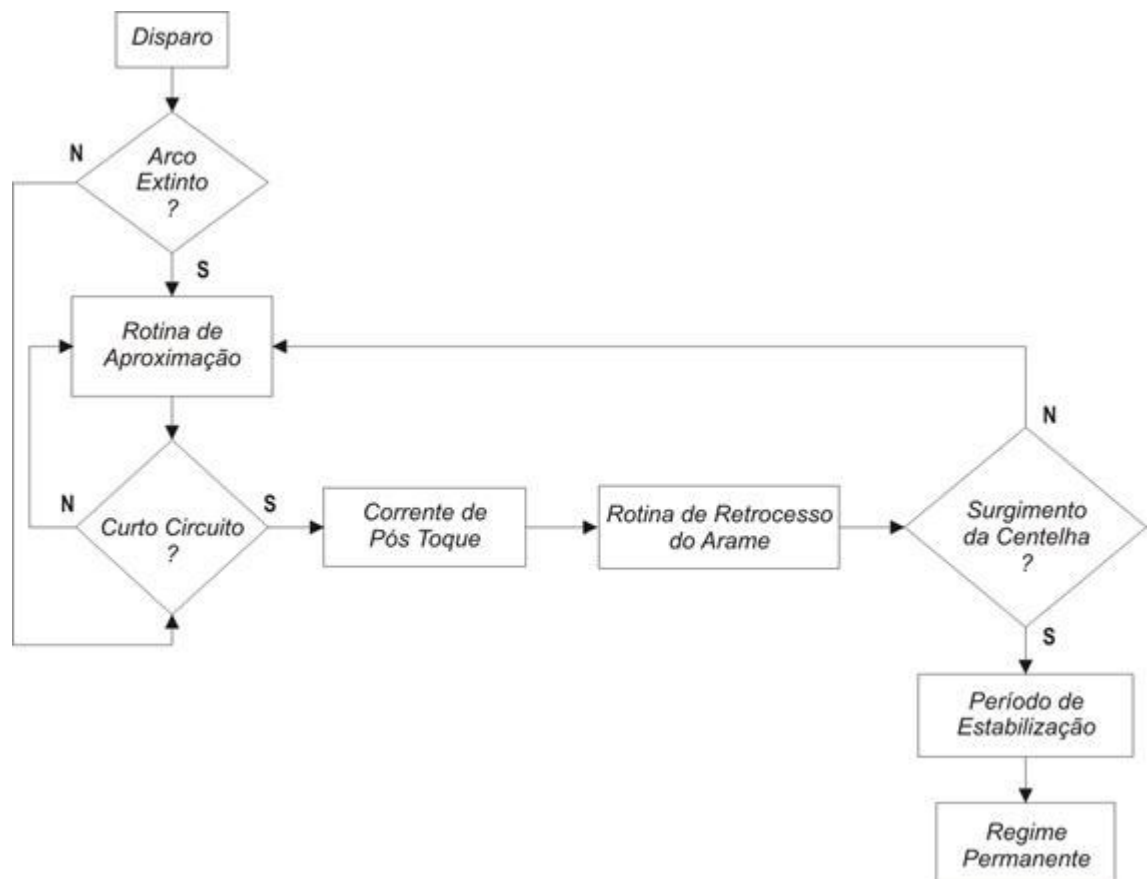


Figura 4.12 – Fluxograma do procedimento de abertura suave do arco

4.4 Novo método de Controle de Comprimento de Arco

O comando de corrente no processo MIG/MAG gera, como citado, particularidades do ponto de vista de rigidez do arco voltaico durante o regime permanente. Estas particularidades, além de estarem fundamentalmente ligadas à concepção do processo, estão, também, relacionadas com a dependência do material que está sendo soldado. Observa-se que aços em geral, têm seus problemas de estabilidade pouco pronunciados, o que não ocorre com materiais com alta condutibilidade térmica e elétrica, como alumínio, cobre e suas ligas, por exemplo [8].

Estes materiais, devido à suas propriedades físicas, têm problemas relativos à manutenção do comprimento de arco agravados durante a soldagem. Observa-se, com facilidade, que estes metais apresentam um tempo de recuperação das condições de estabilidade maiores que os demais materiais, assim, a partir de um transitório qualquer do processo, como por exemplo, mudança abrupta da distância entre o bico de contato e a peça, ou até mesmo a variação da espessura da chapa que se está soldando, a dinâmica de recuperação do comprimento do arco voltaico é mais problemática. A Figura 4.13 ilustra uma comparação entre o comportamento da soldagem MIG/MAG por comando de corrente no aço e no alumínio.

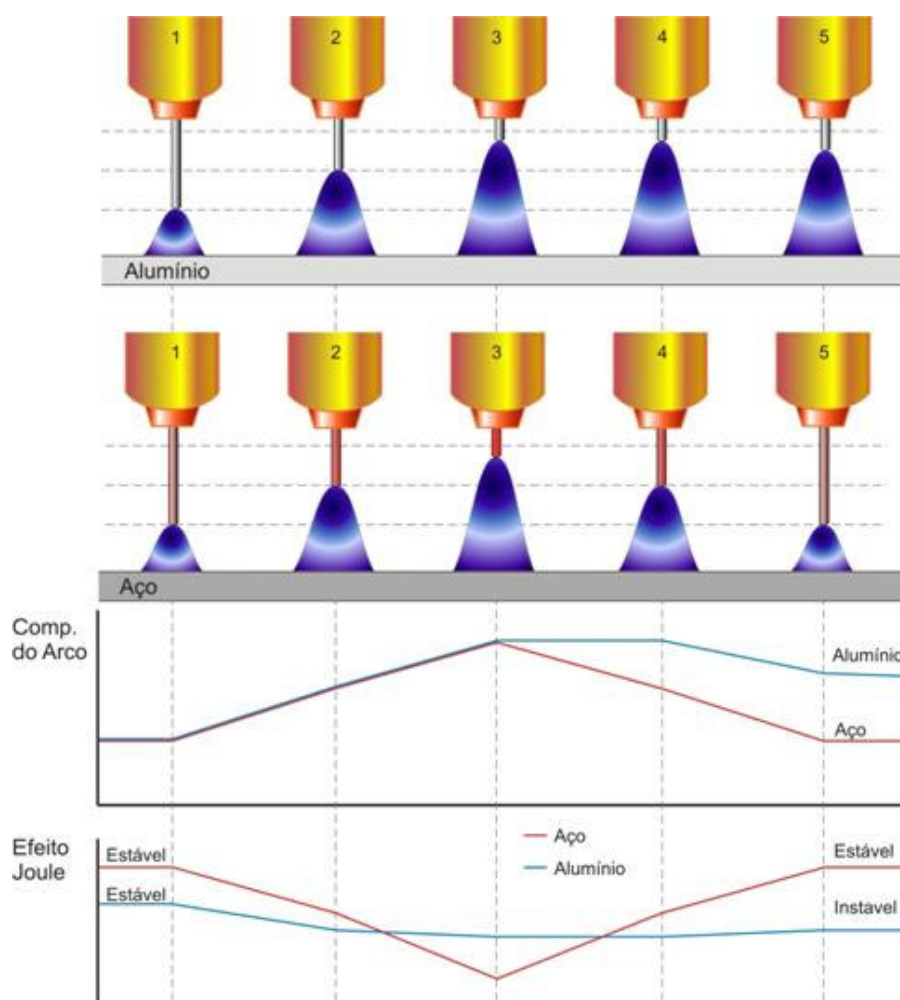


Figura 4.13 – Comparação entre aço e alumínio no processo MIG/MAG

Este particular comportamento de metais como alumínio, deve-se, principalmente, a pequena sensibilidade que o processo MIG/MAG tem em relação à variação do comprimento do segmento sólido do arame-eletrodo, *stick out*, Figura 4.14, na soldagem deste metal.

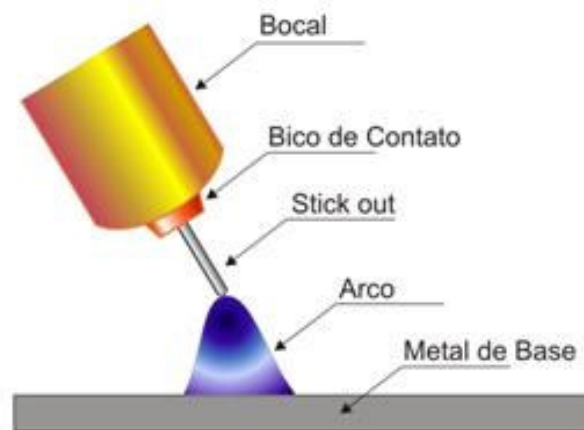


Figura 4.14 – Nomenclatura utilizada na soldagem MIG/MAG

A alta condutibilidade elétrica faz com que o aquecimento por efeito joule, provocado pela circulação de corrente elétrica através do segmento sólido de arame-eletrodo, não seja significativo na soldagem de alumínio. Portanto, a variação do seu comprimento não é muito representativa se comparada com a taxa de fusão do processo como nos aços em geral, que tem condutibilidades elétricas relativamente baixas [8].

$$\textit{Taxa_Fusão} \approx \textit{Aquec.EfeitoJoule} + \textit{Aquec.Bombardeio Elétrons}$$

Equação 4.2 – Taxa de fusão no processo MIG/MAG

Pode-se estabelecer o comprimento do arco no processo MIG/MAG, através da relação entre o equilíbrio da taxa de fusão e da velocidade de alimentação de arame-eletrodo. Entretanto, a taxa de fusão, em uma visão simplificada do processo MIG/MAG, pode ser dividida em dois termos, conforme a Equação 4.2. O aquecimento provocado pelo bombardeio de elétrons na ponta do metal de adição é função dos níveis de corrente empregados no processo. Como, na modalidade MIG/MAG por comando de corrente, os valores desta última são previamente estabelecidos, este termo, sofre pouca variação durante toda a execução do cordão. Porém, o aquecimento por efeito joule é dependente da corrente de soldagem e também do comprimento do *stick out*, tornando esta seção de metal importante para o devido equilíbrio do processo.

Como citado, a baixa condutibilidade elétrica de metais como alumínio, torna, neste caso, a parcela referente ao aquecimento por efeito joule menos significativa, fazendo com que a variação da taxa de fusão, em virtude da redução ou alongamento do *stick out* durante o cordão, ocorra de forma mais lenta.

Neste sentido, desenvolveu-se o método de controle de altura de arco tomando o alumínio como material de prova, já que seu particular comportamento caracteriza-se como um dos mais problemáticos na soldagem MIG/MAG por comando de corrente e, também, é antigo conhecido da equipe de pesquisa do LABSOLDA [8]. Com este procedimento, os resultados obtidos para o alumínio podem ser extrapolados para outros materiais, em virtude da maior facilidade em se obter condições satisfatórias de estabilidade nos demais metais.

4.4.1 Procedimento de Controle de Comprimento de Arco

O sistema de controle foi estruturado a partir da teoria clássica de sistemas realimentados, o diagrama de blocos genérico é apresentado na Figura 4.15.

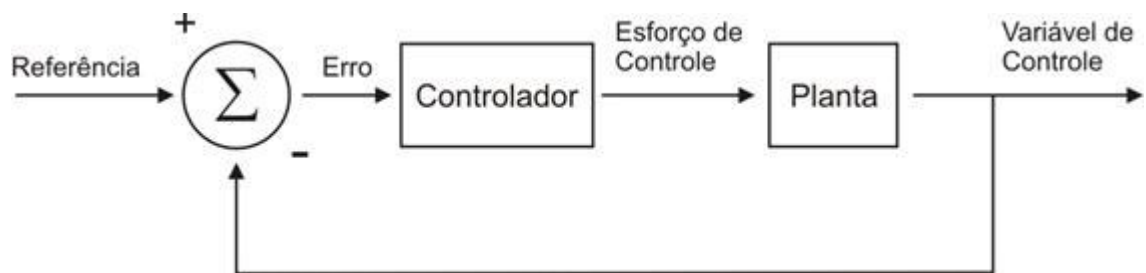


Figura 4.15 – Estrutura clássica de controle

A generalização do sistema, em um primeiro momento, é fundamental para a estruturação organizada e eficaz de um método de controle sobre o arco, podendo, a partir deste modelo clássico, desenvolver diversas lógicas com os diferentes parâmetros do processo de soldagem.

Cada bloco, bem como, cada sinal pertencente ao fluxo de controle, tem sua correspondência direta com o processo de soldagem. Dessa maneira, particularizou-se a estrutura clássica de controle para a aplicação sobre a estabilidade do processo MIG/MAG por comando de corrente, como se observa na Figura 4.16.

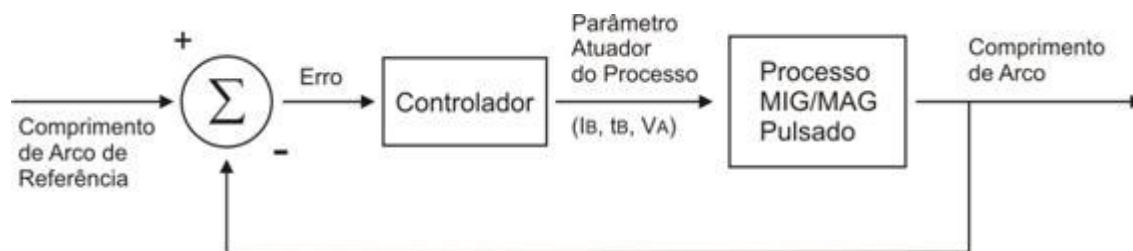


Figura 4.16 – Estrutura clássica de controle adaptada ao processo MIG/MAG pulsado

Para a implementação deste procedimento de controle, utilizou-se a modalidade MIG/MAG por comando de corrente *pulsada*, bastante conhecida no meio científico e de ampla aplicação em equipamentos comerciais. Em poucas palavras, esta variação da modalidade MIG/MAG consiste no comando de corrente entre dois níveis bem definidos, pulso e base, cada um deles com funções específicas dentro do processo [9].

A *planta* do sistema de controle, isto é, a estrutura a ser controlada, é o próprio processo de soldagem e, utiliza como variável de controle o comprimento do arco voltaico. Nesta estrutura clássica de sistemas realimentados, o sinal correspondente à altura do arco é comparado a um comprimento de referência gerando um sinal de erro que é injetado no *controlador*. O erro é processado por este último que, por sua vez, age diretamente no processo de soldagem por meio da variação dos parâmetros da modalidade.

Neste trabalho, utilizou-se como *atuadores*, ou *esforço de controle* (E.C), três parâmetros, *corrente de base* (Ib), *tempo de base* (tb) e *velocidade de alimentação de arame-eletrodo* (Va), cada um deles agindo de forma separada, com o objetivo de obter informações sobre as diferentes respostas causadas sobre a modalidade.

Com o sistema configurado, iniciou-se a inserção da malha de controle do processo de soldagem, inicialmente, dando-se prioridade à obtenção dos sinais de leitura de comprimento de arco e erro, seguindo imediatamente para a estruturação do *controlador*.

4.4.1.1 *Leitura do Comprimento do arco*

A escolha do comprimento do arco voltaico como variável de controle advém dos estudos já mencionados feitos sobre a estabilidade do processo MIG/MAG por comando de corrente. Manter a altura do arco dentro de níveis adequados, de certa forma, garante a estabilidade da modalidade em foco, viabilizando a obtenção de um cordão de solda com uma uniformidade aceitável.

A leitura do comprimento do arco voltaico, como esperado, é feita de forma indireta. Devido à característica de imposição de corrente do processo em questão, pode-se determinar o comprimento do arco mediante a simples leitura da tensão sobre o mesmo. O SAC é configurado com um canal para a leitura da tensão sobre o arco, facilitando, desta forma, a obtenção do sinal correspondente ao comprimento do mesmo e poupando novas implementações de hardware.

A pulsação de corrente, característica do processo, faz com que a tensão de arco oscile da mesma forma. Cabe ressaltar a informação de que, a variação de tensão ao longo da pulsação de corrente não corresponde simplesmente à oscilação do comprimento do arco. Devido à variação dos níveis de corrente, mesmo que o arco permaneça com o mesmo comprimento, a tensão gerada pela circulação desta última através da atmosfera gasosa gera sinais de tensão variantes, conforme visto na Figura 4.17.

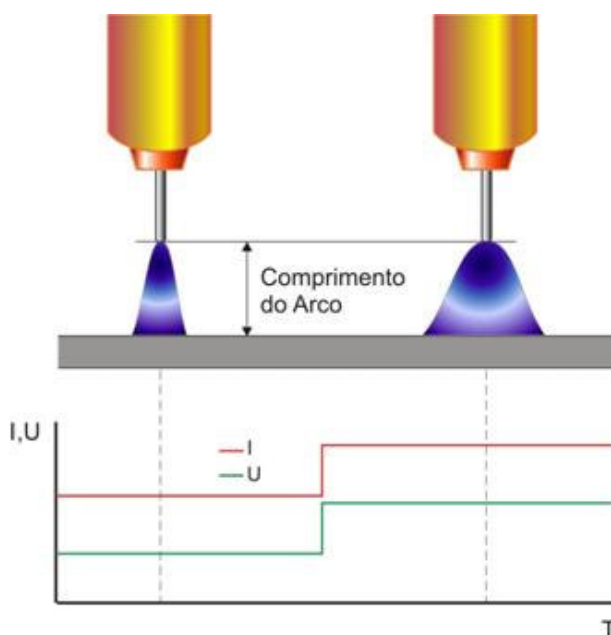


Figura 4.17 – Variação da tensão para o mesmo comprimento de arco

Entretanto, observam-se, também, variações de comprimento de arco devido à alternância entre base e pulso durante o regime permanente do processo, Figura 4.18.

Durante o período de base, as correntes envolvidas não são capazes de efetuar a fusão significativa do arame-eletrodo e há um desequilíbrio instantâneo entre sua velocidade de alimentação e taxa de fusão. Este desequilíbrio ocasiona a aproximação do arame-eletrodo à peça e, conseqüentemente, a redução do comprimento do arco voltaico.

Por outro lado, durante o período de pulso existe todo o fenômeno da transferência metálica [9], as correntes envolvidas são elevadas e fundem significativamente o arame-eletrodo, proporcionando, neste período, uma taxa de fusão muito mais elevada que a velocidade de alimentação de arame-eletrodo. Esses desequilíbrios momentâneos, quando bem dimensionados, proporcionam um

comprimento de arco médio e equilibrado, porém, sujeito à instabilidades inerentes do processo, conforme explicações em seções anteriores.

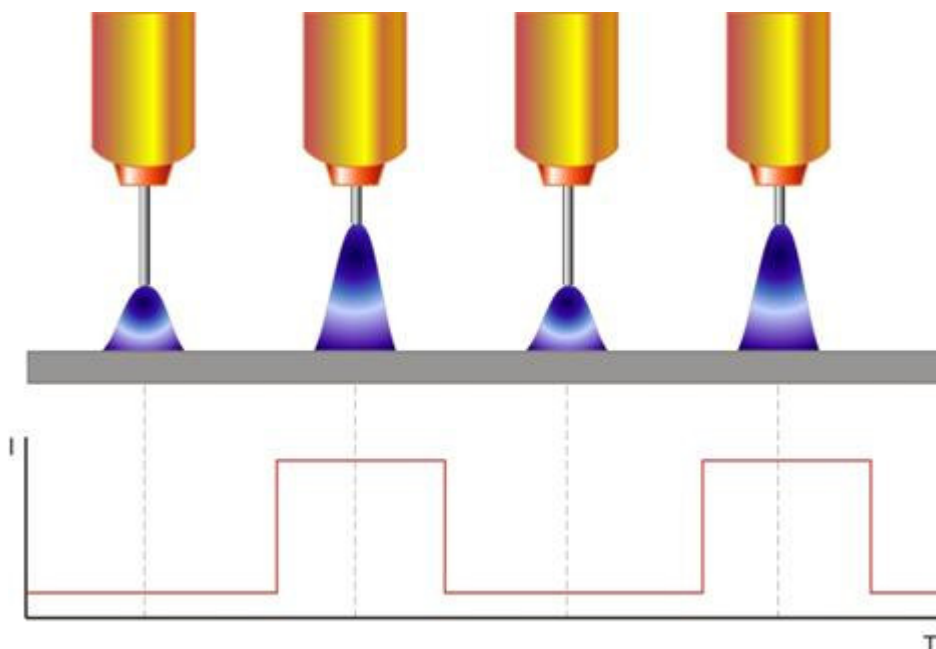


Figura 4.18 – Variação do comprimento de arco de acordo com a pulsação de corrente durante o regime permanente

Intuitivamente, o comprimento do arco real é refletido sobre o valor da tensão média, no entanto, em sistemas realimentados, a utilização de valores médios para a leitura da variável de controle injeta no sistema uma constante de tempo proporcional ao tamanho desta média, ou seja, quanto maior o número de pontos utilizados para o cálculo da média, maior o tempo que a mesma demora para reagir às possíveis flutuações do arco.

A demora na resposta do valor médio de tensão a um novo comprimento de arco pode causar oscilações indesejáveis e agravar ainda mais o problema de estabilidade do processo. Neste sentido, trabalhou-se com a hipótese de leitura de tensão média somente em uma das fases do período, na fase de pulso ou de base.

Durante a fase de pulso, existe um maior número de pontos catódicos ao redor da poça metálica, dado os elevados níveis de corrente envolvidos durante este período. O maior número de pontos catódicos faz com que o feixe de elétrons, na direção da peça para a ponta do arame-eletrodo, não varie seu comprimento abruptamente, mantendo, desta forma, o arco mais rígido e com uma variância menor [10].

Nesta situação, durante o período de base, tem-se uma quantidade reduzida de pontos de emissão, o que faz o feixe de elétrons saltar de um ponto a outro de forma brusca, provocando flutuações significativas no comprimento deste feixe e, conseqüentemente, na leitura da tensão. A Figura 4.19 ilustra esta situação.

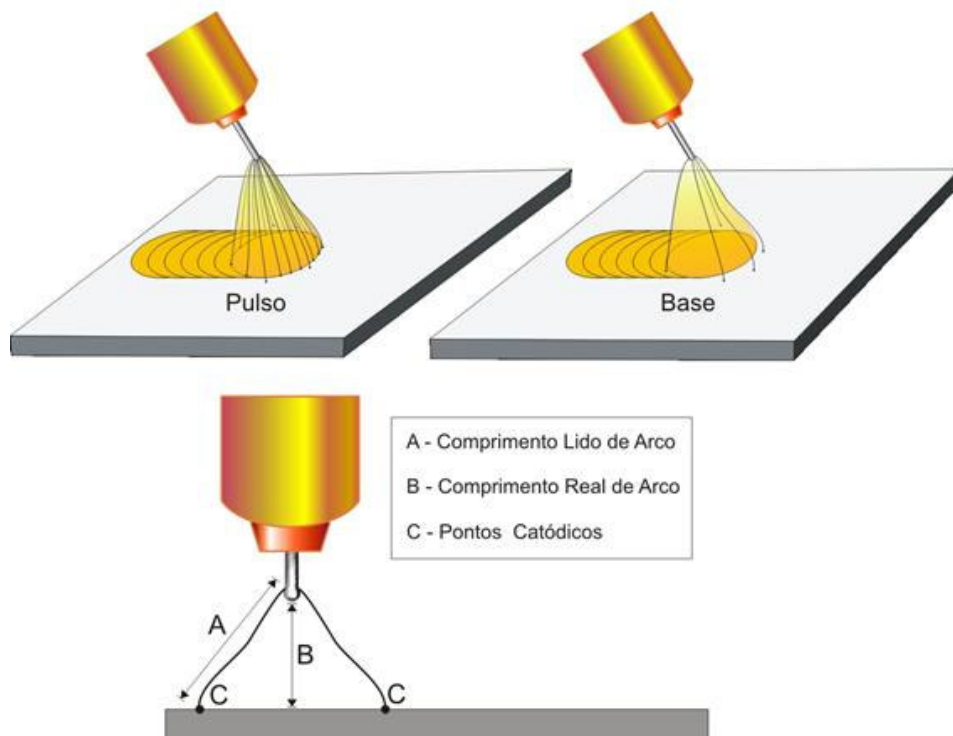


Figura 4.19 - Diferença de número de pontos catódicos entre base e pulso

É evidente através da análise da Figura 4.19, que a tensão lida durante o período de pulso está mais próxima da leitura do comprimento real do arco ' L ', o que tendência em se obter o valor da tensão de arco durante este período.

Entretanto, durante o período de pulso ocorre a transferência metálica, fenômeno que gera oscilações significativas na tensão de arco, Figura 4.20. O aumento vertiginoso da tensão no final da fase de pulso se deve ao esticcionamento da gota metálica, e não, a uma variação de comprimento de arco. Portanto, a leitura da tensão durante a fase de pulso pode mascarar o comprimento real do arco, gerando um erro de difícil filtragem via software, visto a aleatoriedade deste fenômeno.

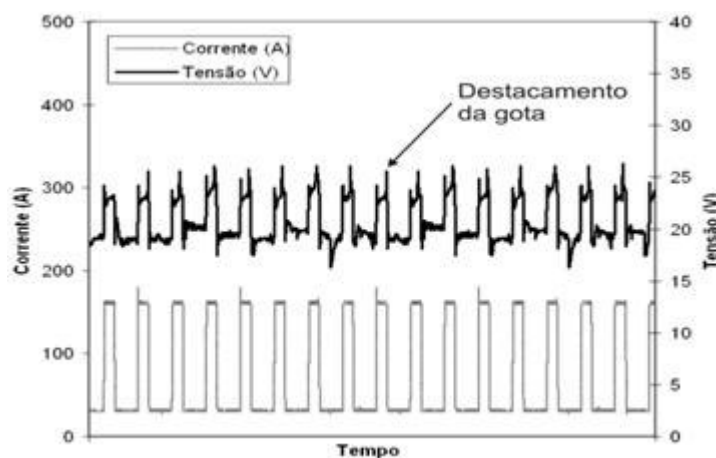


Figura 4.20 – Oscilogramas do processo MIG/MAG pulsado

Além da problemática da transferência metálica durante a fase de pulso, há também, a restrição condizente ao tempo em que se efetuará a leitura da tensão neste período. Os tempos de pulso utilizados, convencionalmente, são reduzidos se comparados aos de base, o que limita a quantidade de aquisições de tensão

executadas, trazendo uma grande probabilidade de erros de leitura não serem filtrados pela média executada nesta fase.

Durante o período de base, normalmente, poucas turbulências no sinal de tensão são identificadas. Apesar de o valor absoluto da tensão lida não condizer com o comprimento real do arco, o bom comportamento da tensão de base faz com que as lógicas de controle convencionais tenham maior facilidade de chegar a um ponto de equilíbrio. O período de base, ainda, tem a conveniência de sua duração ser um pouco mais elevada, o que filtra, de forma natural, possíveis pontos errôneos da média.

Por estes motivos, definiu-se o período de base como o momento mais adequado para se efetuar a leitura da tensão do arco voltaico. E, iniciou-se todo o desenvolvimento da estrutura de controle baseado neste momento de aquisição de sinal.

Mesmo com o bom comportamento da tensão de base durante o regime permanente, observa-se nos oscilogramas que no momento do transitório do pulso para a base há uma oscilação na tensão, Figura 4.21. Esse fato pode ser atribuído a uma série de fenômenos, dentre eles, a característica da fonte de soldagem que permite um leve sobredepassamento da corrente, que acaba por refletir na tensão, oscilações da poça metálica em virtude da variação abrupta entre dois níveis de corrente e também as indutâncias parasitas dos cabos utilizados.

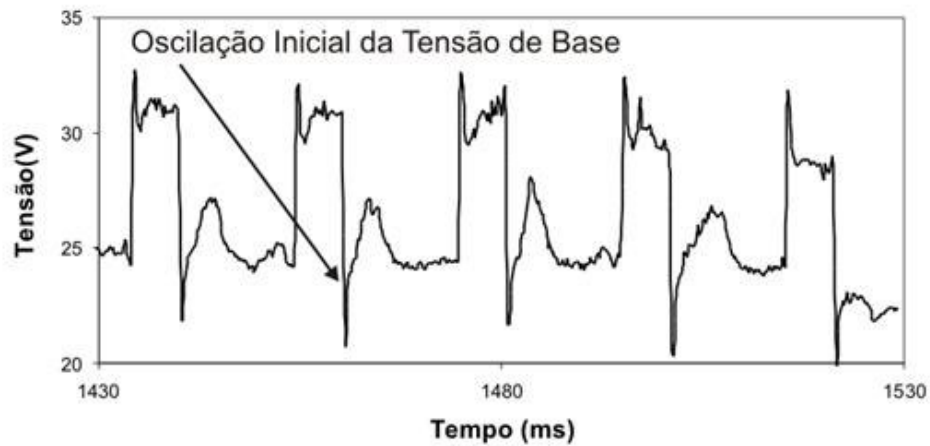


Figura 4.21 – Efeitos pulsação da corrente sobre a tensão de arco

No SAC, as rotinas programadas executam a leitura da tensão de arco apenas no período de base e ignorou-se, via software, os primeiros instantes desta fase, para não incluir nos cálculos dados que não correspondam ao comprimento do arco. O tempo definido para este intervalo onde não se efetua a leitura da tensão de arco é de 2 (ms), estipulado de forma arbitrária, com base na simples observação de oscilogramas.

A leitura da tensão ocorre durante todo o tempo de base, e os dados são armazenados em forma de vetor pelas rotinas de controle do SAC, para posteriormente, a média da tensão de arco ser calculada.

A Figura 4.22 apresenta um oscilograma idealizado da tensão do arco e as aquisições feitas para o procedimento de controle de altura de arco.

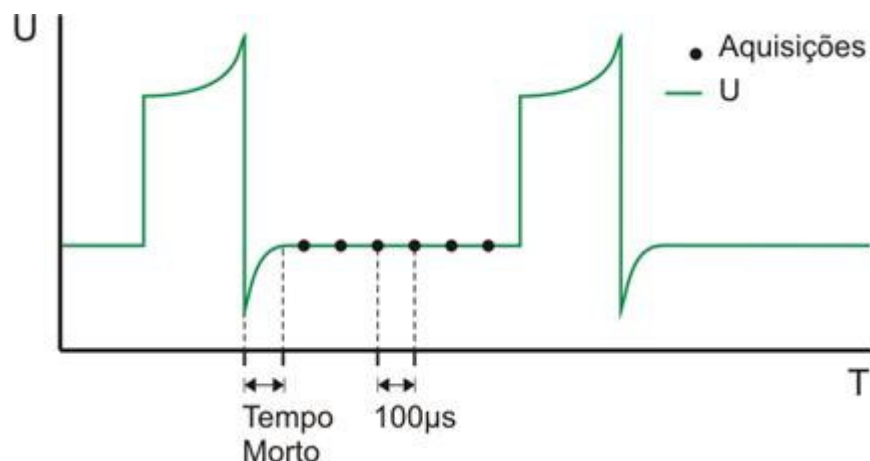


Figura 4.22 – Aquisição da tensão de arco durante o tempo de base

O número de pontos utilizados para o cálculo da média é proporcional ao tempo de base, permitindo um número elevado de aquisições. As rotinas de controle do SAC somente calculam a média da tensão de arco, durante o período de pulso subsequente, assim, o vetor de dados correspondentes a leitura das tensões durante a base fica armazenado na memória dinâmica do SAC até que se entre numa nova fase de pulso.

4.4.1.2 Obtenção do sinal de erro

Após as aquisições de tensão do arco durante o período de base, o processo, sob comando do SAC, retorna para a fase de pulso. Durante o período de pulso, nenhuma aquisição é feita, pois é nesta fase que todos os cálculos das rotinas de controle de comprimento do arco são executados.

Inicialmente, como mencionado, o software calcula a média da tensão de base anterior, por meio do vetor de dados armazenados em memória. A média calculada é comparada com uma tensão de referência, que é um dado de entrada

do software. Esta comparação é feita por meio de uma simples subtração como ilustra a Equação 4.3.

$$\textbf{\textit{Erro}} = \textbf{\textit{Tensãoolida}} - \textbf{\textit{Tensãoreferência}}$$

Equação 4.3 - Equação de erro

A tensão de referência pode ser considerada como o ajuste do comprimento do arco, ou seja, é por meio deste parâmetro que se pode alterar a altura do arco durante o processo de soldagem. Entretanto, este valor não deve ser alterado de forma aleatória, visto que a inclusão de uma referência de forma arbitrária pode levar a modalidade de soldagem a operar em diferentes faixas de energia devido à atuação dos controladores, que tentarão impor ao processo parâmetros de soldagem que gerem esta determinada referência.

Assim, a referência de comprimento de arco deve ser obtida, a priori, através da observação de oscilogramas estáveis de tensão do processo MIG/MAG por comando de corrente pulsada sem qualquer tipo de controle, Figura 4.23. Desta forma, garante-se que os controladores atuam somente quando alguma variação das condições de estabilidade do processo for identificada, e mantém os parâmetros de soldagem próximos aos ajustados previamente.

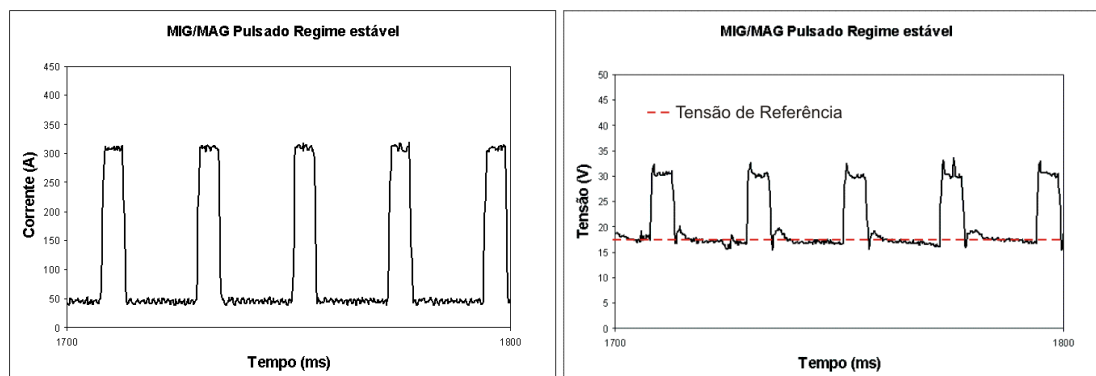


Figura 4.23 – Oscilogramas estáveis do processo MIG/MAG pulsado

É interessante salientar que, uma tensão de referência obtida para um determinado comprimento de arco é válida somente para os parâmetros de soldagem da qual esta referência foi retirada, ou seja, um mesmo comprimento de arco tem diferentes tensões de referência para cada faixa de energia. Este raciocínio se torna evidente ao analisar novamente a Figura 4.17.

A partir da referência de tensão de arco escolhida para a faixa de energia que se deseja trabalhar, as rotinas de controle do SAC executam a comparação com a tensão média da última base e disponibilizam aos controladores o sinal de erro correspondente.

4.4.1.3 Controladores

Os controladores do sistema são os responsáveis por processar os sinais de erro obtidos pela comparação entre tensão média de base e tensão de referência e, a partir desses dados, gerar o esforço de controle necessário para correção do comprimento de arco. Este esforço de controle é caracterizado pela variação

apropriada de algum parâmetro do processo que, intuitivamente, tenha efeito oposto sobre o arco voltaico, assim, caso ocorra um aumento no comprimento do mesmo, o esforço de controle deve ser capaz de diminuir a sua altura e vice-versa.

A lógica do sistema proposto é baseada na utilização de controladores *Proporcional-Integral-Derivativo* (PID). Atualmente, estes controladores correspondem a uma fatia considerável das aplicações empregadas na indústria e, em função disto, tem seu funcionamento, bem como suas características, bastante difundidas no meio científico. Sua ampla aplicabilidade, também, diz respeito à sua fácil implementação e adaptação em sistemas discretos, como é caso do SAC. Desta forma, o equacionamento necessário para proporcionar o efeito do controlador PID é de fácil redação em linhas de código de programa como demonstrado na Equação 4.4.

$$\begin{aligned}P &= K_p \times erro \\I &= I^* + K_I \times erro \\D &= K_{D1} \times erro + K_{D2} \times (erro - erro^*) \\E.C. &= P + I + D\end{aligned}$$

Equação 4.4 – Equacionamento do controlador PID

Assim, o controle é feito em três etapas distintas, cada qual com suas constantes e com diferentes comportamentos perante o sistema. A parcela proporcional do controlador tem seu funcionamento similar a um controle instantâneo e sem memória, visto a necessidade contínua da existência de um erro diferente de zero para que esta parcela não seja nula.

O controle integral tem sua função relacionada ao erro em regime permanente, a sua atuação no sistema tende a reduzir a zero o esforço de controle em situações de estabilidade. Por último, a parcela derivativa caracteriza-se por sua função preditiva, isto é, devido à sua relação diferencial, a mesma consegue suavizar transitórios, evitando oscilações em regime permanente [11].

O E.C., ilustrado na Equação 4.4, é, a princípio, uma variável genérica e diz respeito a um parâmetro do processo de soldagem apropriadamente escolhido. Para se obter um controle efetivo sobre o arco é necessário intervir diretamente sobre o equilíbrio existente entre taxa de fusão e velocidade de alimentação de arame-eletrodo.

A velocidade de alimentação de arame-eletrodo é um parâmetro perfeitamente controlável via software e, apesar de ter influência direta sobre algumas propriedades do processo, como tamanho de gota [9], permite sua variação, dentro de limites operacionais, sem danos significativos à estabilidade do arco, o que torna aconselhável o seu uso como esforço de controle no sistema.

Para intervir sobre a taxa de fusão do processo, deve-se agir sobre a corrente média. Sabe-se que, os parâmetros de pulso não devem ser alterados à livre arbítrio, sob pena de influenciar na transferência metálica e, conseqüentemente, afetar a estabilidade do processo. Desta maneira, apenas os parâmetros de base estão sujeitos a funcionarem como esforço de controle no sistema proposto, já que a variação dos mesmos, dentro de limites bem determinados, acarreta, fundamentalmente, apenas flutuações da energia entregue ao cordão, o que não compromete as condições de manutenção do arco.

No SAC há três variantes para o sistema de controle PID proposto para estabilização do arco em regime permanente, uma para cada esforço de controle previsto: corrente de base, tempo de base e velocidade de arame-eletrodo.

4.4.1.3.1 Realimentação pela corrente de base

A corrente de base obedece a uma relação linear com a corrente média, como identificado na Figura 4.24. Esta relação permite um fácil ajuste dos parâmetros do controlador, pois a taxa de variação da corrente média é sempre a mesma, o que implica em se ter, teoricamente, a mesma constante de tempo para a resposta do arco à ação de controle em toda faixa de operação.

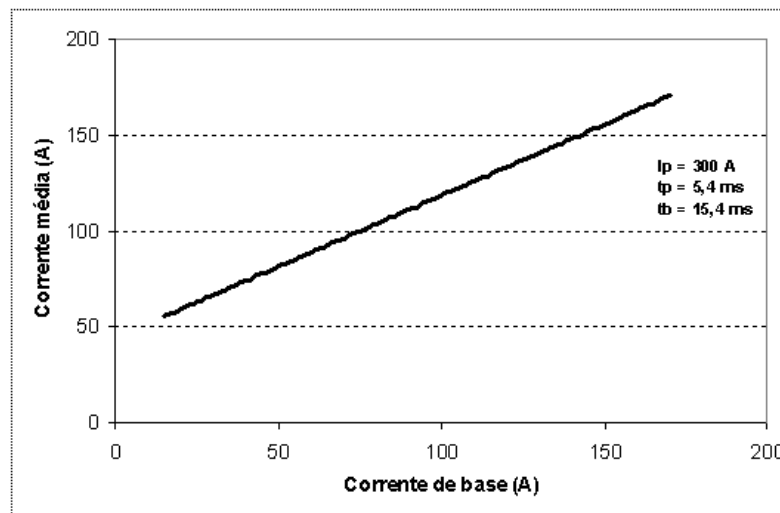


Figura 4.24 – Relação linear entre corrente de base e corrente média

As equações do controlador PID do sistema proposto aplicadas à corrente de base são ilustradas na Figura 4.25. As rotinas de controle desenvolvidas calculam

uma nova corrente de base a para cada período, com o objetivo de ajustar o comprimento de arco para alturas dadas como referência ao sistema.

```
Procedure CalcularPID_Ib(VariavelDeControle,g1,g2,g3,g4:real);  
  
begin  
  ControleP := g1*VarRealimentacao;  
  ControleI := VariavelDeControle+g2*VarRealimentacao;  
  ControleD := g3*ControleD_anterior - g4*(VarRealimentacao-  
    erro_anterior);  
  erro_anterior := VarRealimentacao;  
  ControleD_Anterior := ControleD;  
  VarRealimentacao:= ControleP+ControleI+ControleD;  
end;
```

Figura 4.25 – Algoritmo do Controlador PID para a corrente de base

A reação do sistema perante o intermitente ajuste da corrente de base, quando os parâmetros do controlador estão adequadamente definidos, pode ser observada na Figura 4.26. É possível dividir a ação do controle em duas faixas, a correção positiva, quando os controladores impõem correntes de base elevadas para aumentar o comprimento do arco, e a correção negativa, com objetivo contrário, diminuir a corrente de base, proporcionando a redução da altura do arco.

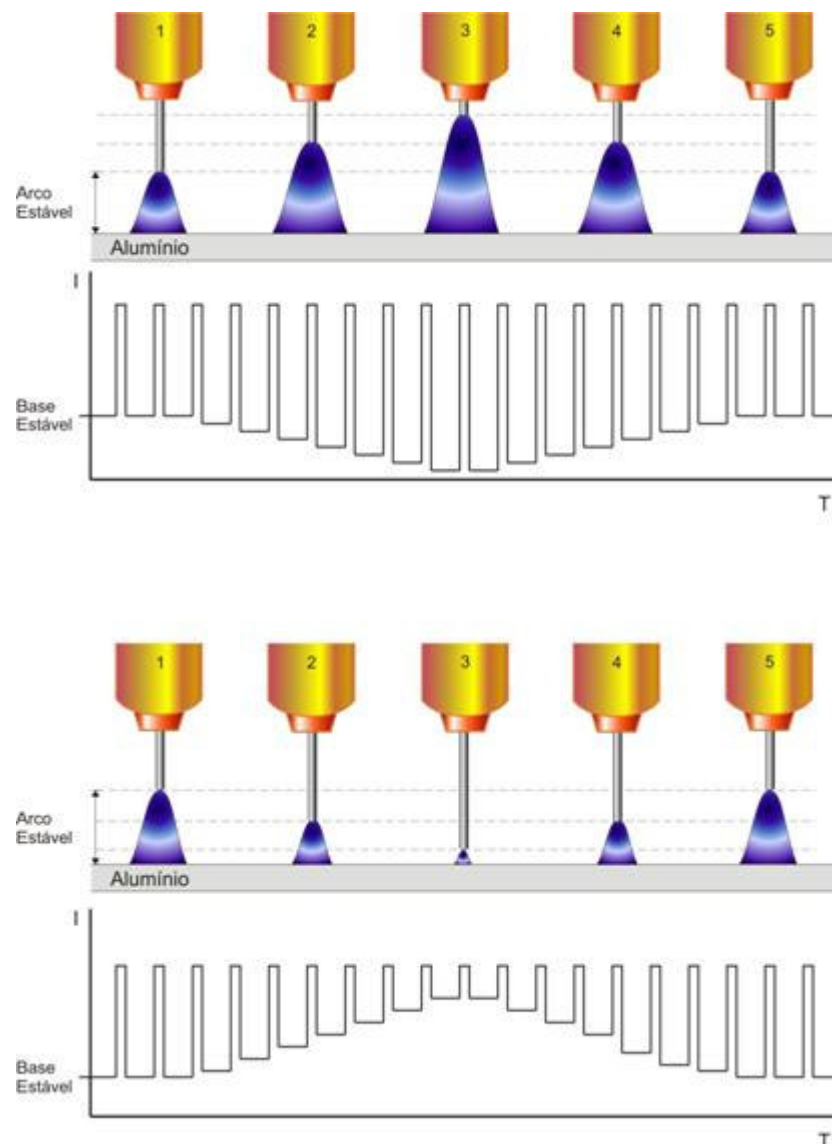


Figura 4.26 – Ações de controle positivas e negativas (corrente de base)

A utilização da corrente de base como esforço de controle acarreta a particularidade, já mencionada anteriormente, porém, com outro enfoque. A variação da corrente de base para ajuste do comprimento de arco pode vir a mascarar as variações de altura do mesmo, já que é possível se ter o mesmo comprimento de arco com tensões de base diferentes. No instante em que o SAC impõe à fonte de soldagem uma correção sobre a corrente de base do processo, automaticamente, a

tensão de base sofre uma variação proporcional no mesmo sentido, o que pode provocar problemas em ajustes finos sobre o processo, submetendo o mesmo a pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio.

4.4.1.3.2 Realimentação pelo tempo de base

Diferentemente da corrente de base, o tempo de base não tem uma relação linear com a corrente média, conforme a Figura 4.27. Como consequência imediata deste fato, observa-se que são sensibilidades diferentes à variação da altura do arco ao longo da faixa de operação, desta forma, o tempo de resposta do sistema varia de acordo com o ponto de operação, o que traz dificuldades no dimensionamento dos parâmetros do controlador.

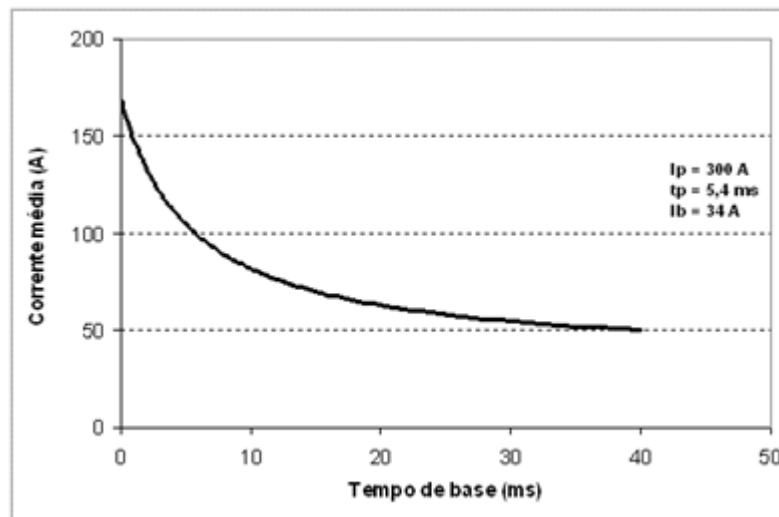


Figura 4.27 - Relação não-linear entre tempo de base e corrente média

Conclui-se, após análise da Figura 4.27 que, para pequenos tempos de base, variações causam oscilações abruptas da corrente média que são refletidas da mesma forma sobre o arco voltaico. Como regra geral, pode-se afirmar que para correções positivas do tempo de base, ou seja, redução da corrente média e, conseqüentemente, do comprimento de arco, tem-se uma constante de tempo maior na resposta do sistema, quando comparadas às correções negativas do tempo de base. A ilustração para ambas as correções são apresentadas na Figura 4.28.

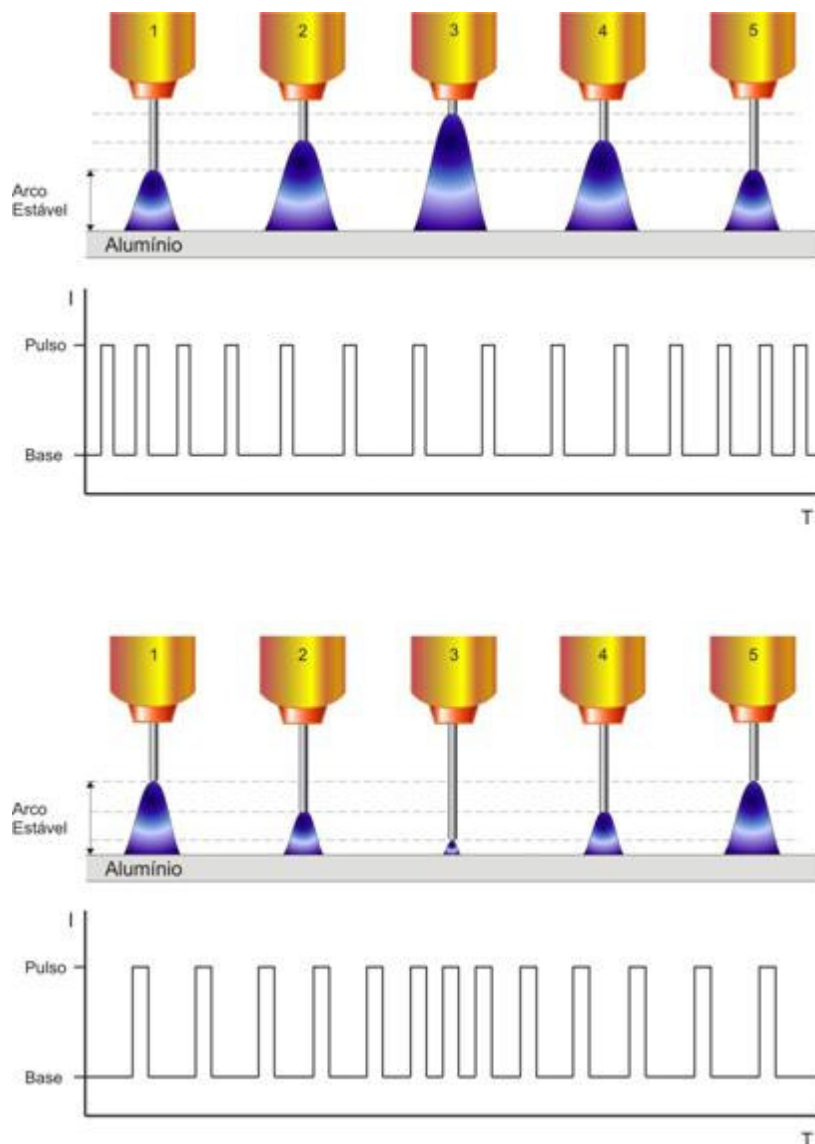


Figura 4.28 – Ações de controle positivas e negativas (tempo de base)

Devido a diferentes dinâmicas de resposta do controlador PID em função do sentido da correção imposta pelo mesmo, implementou-se um algoritmo de controle diferenciado para utilização do tempo de base como esforço de controle, como mostra a Figura 4.29.

```
Procedure CalcularPID_tb_subida(VariavelDeControle,g1,g2,g3,g4:real);  
  
begin  
    ControleP := g1*VarRealimentacao;  
    ControleI := VariavelDeControle+g2*VarRealimentacao;  
    ControleD := g3*ControleD_anterior - g4*(VarRealimentacao-  
erro_anterior);  
    erro_anterior := VarRealimentacao;  
    ControleD_Anterior := ControleD;  
    VarRealimentacao:= ControleP+ControleI+ControleD;  
end;  
  
Procedure CalcularPID_tb_descida(VariavelDeControle,g1,g2,g3,g4:real);  
  
begin  
    ControleP := g1*VarRealimentacao;  
    ControleI := VariavelDeControle+g2*VarRealimentacao;  
    ControleD := g3*ControleD_anterior - g4*(VarRealimentacao-  
erro_anterior);  
    erro_anterior := VarRealimentacao;  
    ControleD_Anterior := ControleD;  
    VarRealimentacao:= ControleP+ControleI+ControleD;  
end;
```

Figura 4.29 - Algoritmo do Controlador PID para o tempo de base

Observa-se, na Figura 4.29, que, o algoritmo inserido nas rotinas do SAC para o uso do tempo de base como esforço de controle leva em consideração o sentido da correção que deverá ser executada. Por meio da verificação do sinal do erro gerado na base anterior, consegue-se separar as respostas em cada um dos sentidos de correção, fazendo com que o sistema funcione de forma similar quando

dois controladores agem no processo. Desta maneira, minimiza-se a não linearidade da resposta dada ao arco, facilitando a estabilização do sistema.

4.4.1.3.3 Realimentação pela velocidade de alimentação de arame-eletrodo

O uso da velocidade de arame-eletrodo para controlar o comprimento de arco é um artifício executado com relativa frequência no processo MIG/MAG. Este tipo de controle, feito de forma manual, traz resultados apreciáveis e corrige, de forma satisfatória, eventuais instabilidades do arco.

Porém, a velocidade de arame-eletrodo utilizada em sistemas realimentados como esforço de controle traz inconvenientes à estabilidade do arco, principalmente, no que diz respeito ao tempo de resposta demandado para os tracionadores de arame-eletrodo submeterem o processo a uma variação de velocidade de alimentação. A Figura 4.30 ilustra, teoricamente, a ação da velocidade de alimentação de arame-eletrodo como esforço de controle durante a execução de um cordão.

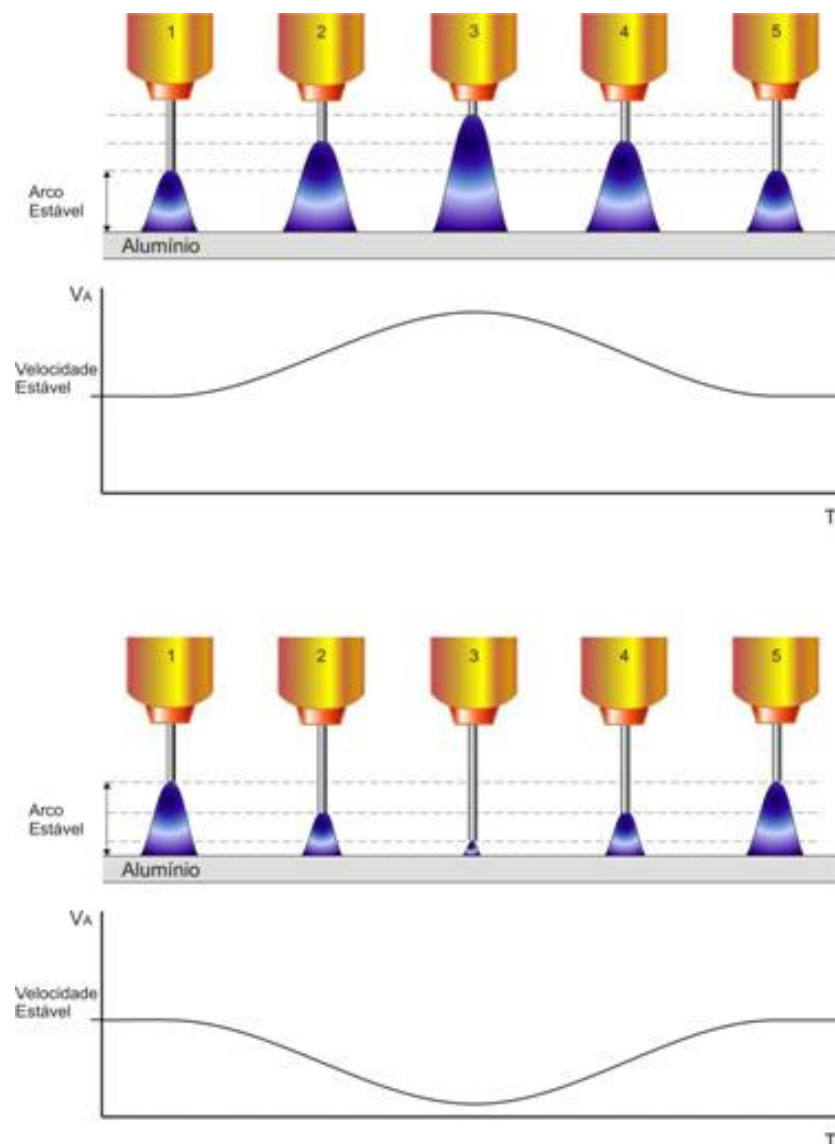


Figura 4.30 – Ações de controle positivas e negativas (velocidade de arame-eletrodo)

No caso específico de trabalhar com a velocidade de alimentação de arame-eletrodo como esforço de controle no sistema proposto neste trabalho, deve-se atentar para o fato de envolver duas constantes de tempo embutidas no sistema, a dos motores do cabeçote de alimentação e a do próprio processo de soldagem, como as demais variáveis utilizadas como esforço de controle, demanda certo tempo para assimilar as flutuações dos parâmetros.

O algoritmo que compõe as rotinas do SAC para o uso da velocidade de arame-eletrodo como esforço de controle no sistema é apresentado na

```
Procedure CalcularPID_va(VariavelDeControle,g1,g2,g3,g4:real);  
  
begin  
ControleP := g1*VarRealimentacao;  
ControleI := VariavelDeControle+g2*VarRealimentacao;  
ControleD := g3*ControleD_anterior-g4*(VarRealimentacao-erro_anterior);  
erro_anterior := VarRealimentacao;  
ControleD_Anterior := ControleD;  
VarRealimentacao:= ControleP+ControleI+ControleD;  
end;
```

Figura 4.31.

Figura 4.31 - Algoritmo do Controlador PID para a velocidade de arame-eletrodo

Similarmente ao algoritmo desenvolvido para a utilização da corrente de base, associa-se apenas uma malha de realimentação para efetuar o controle PID sobre o processo. No entanto, os ganhos de cada parcela do controlador apresentam dificuldades maiores em serem encontrados. Devido às altas constantes de tempo envolvidas nesta malha de controle, pequenos ganhos não são assimilados pelo sistema.

A demora na ação efetiva no arco acaba por insensibilizar o controlador, sendo observadas poucas diferenças na estabilidade do processo. Por outro lado, elevar em demasia os ganhos dos controladores pode gerar instabilidades que ocasionem até a inviabilidade do processo, devido a extinção do arco por meio de curto-circuitos, ou por seus elevados comprimentos.

CAPITULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados do Sistema Avançado de Controle

O Sistema Avançado de Controle, por ser uma plataforma extremamente versátil, encontra-se em contínuo desenvolvimento, se adaptando às diferentes características de cada linha de pesquisa do LABSOLDA. Dessa maneira, não convém tratar o SAC como um sistema estático e com um ponto de finalização bem definido, mas sim, como uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento da tecnologia da soldagem altamente adaptada às necessidades de cada frente de trabalho no laboratório.

Entretanto, sob alguns aspectos pode-se considerar que o sistema já adquiriu formatos definitivos, principalmente no que diz respeito à padronização da interface com o usuário e a estrutura de controle da fonte de soldagem. No presente momento o SAC dá suporte à modalidade MIG/MAG e suas variações, bem como para o processo Curto-Circuito Controlado

5.1.1 Interface do processo MIG/MAG no SAC

Toda a interface de controle e aquisição já se encontra devidamente estruturada para a execução do processo MIG/MAG e suas variabilidades. Em sua plataforma MS-Windows o SAC disponibiliza o acesso ao processo MIG/MAG por meio de suas abas de controle como ilustra a Figura 5.1.

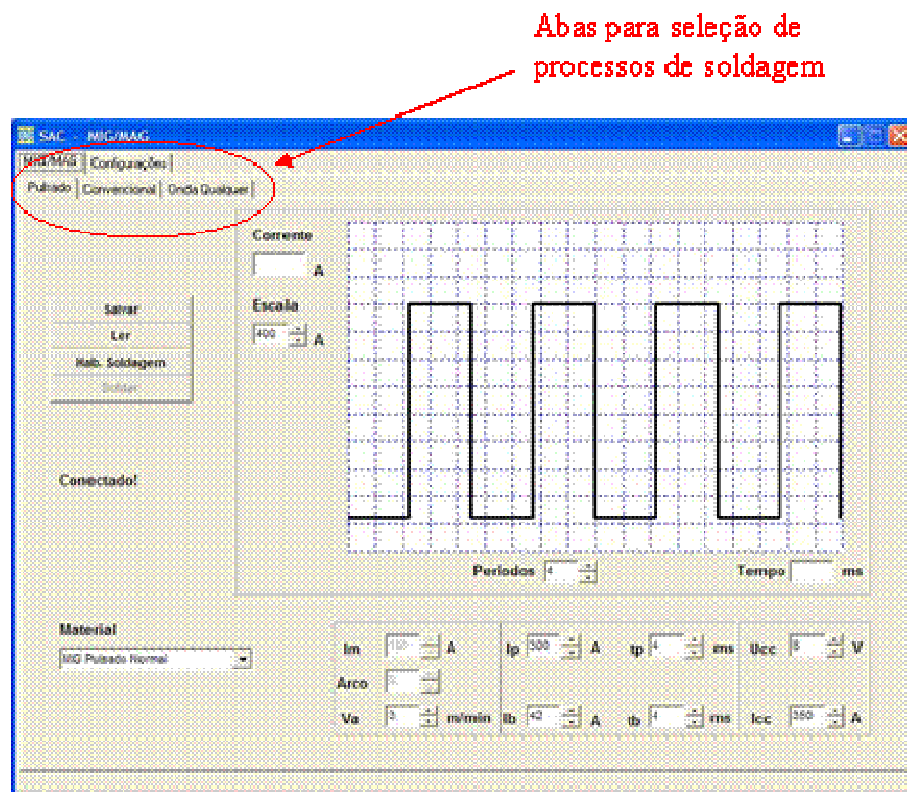


Figura 5.1 – Interface do Sistema Avançado de Controle em sua plataforma Ms-Windows

Atualmente, as variabilidades disponíveis para a soldagem MIG/MAG são as modalidades *MIG/MAG Pulsado*, *MIG/MAG Convencional* e o *MIG/MAG Onda Qualquer*.

5.1.1.1 MIG/MAG Pulsado

A interface criada para soldagem *MIG/MAG pulsado* apresenta a possibilidade de operação em dois módulos distintos, a parametrização sinérgica do processo e a livre parametrização do mesmo.

O módulo definido para livre parametrização consiste em oferecer total liberdade ao ajuste das variáveis de soldagem, ou seja, todos os parâmetros do processo são responsabilidades do operador, conforme identificado na Figura 5.2.

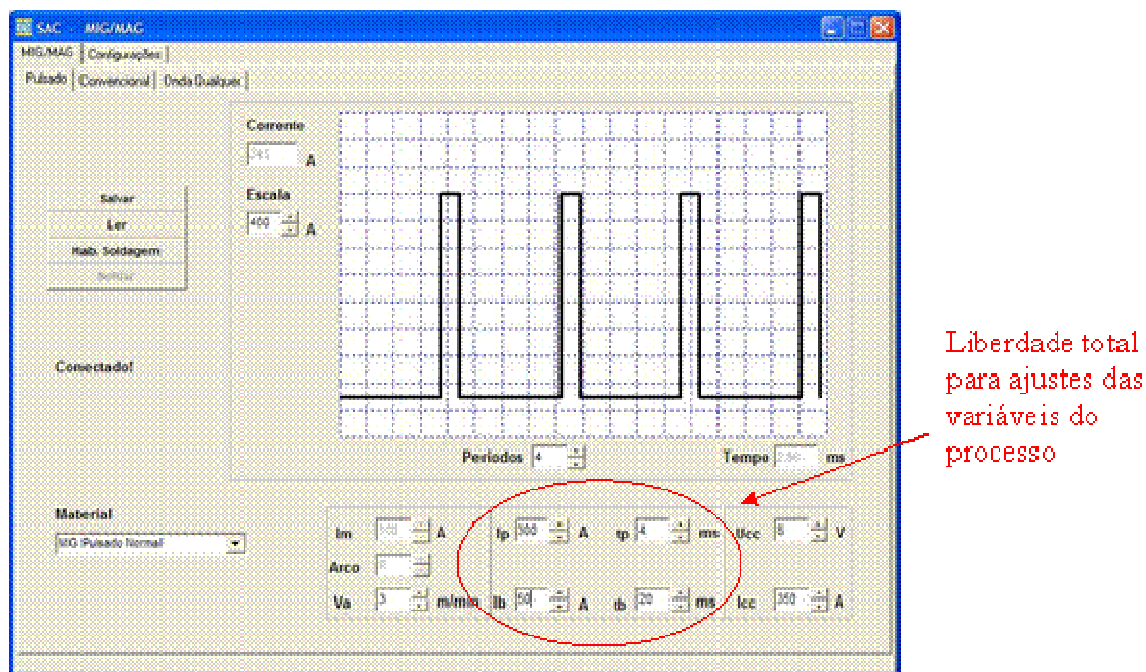


Figura 5.2 – Interface do processo *MIG/MAG Pulsado Normal*

Observa-se, por meio da Figura 5.2, que o operador tem liberdade de alteração inclusive nos parâmetros de pulso do processo, o que implica em um relativo conhecimento por parte do mesmo na execução de tal manipulação. A utilização do módulo de livre parametrização está voltada principalmente à iniciação científica e à pesquisas relacionadas a estudos de transferência metálica, se tornando também uma fonte didática de ensino sobre soldagem.

parte do operador neste módulo de operação é um ajuste sobre o “Arco”, indicado na figura 3. Este ajuste permite eventuais correções de comprimento de mesmo de forma não realimentada, isto é, por meio da variação deste parâmetro o SAC impõe incrementos ou decrementos à velocidade de arame-eletrodo, fazendo com que o arco voltaico varie a sua altura.

5.1.1.3 MIG/MAG Convencional

A interface desenvolvida para o processo MIG/MAG Convencional se apresenta de forma bastante simples, Figura 5.4, já que este processo conta com um número reduzido de variáveis e possui um compromisso entre suas variáveis e oscilogramas de corrente e tensão, até certo ponto, difícil de prever em escala, o que dificulta ilustrar suas formas de onda.

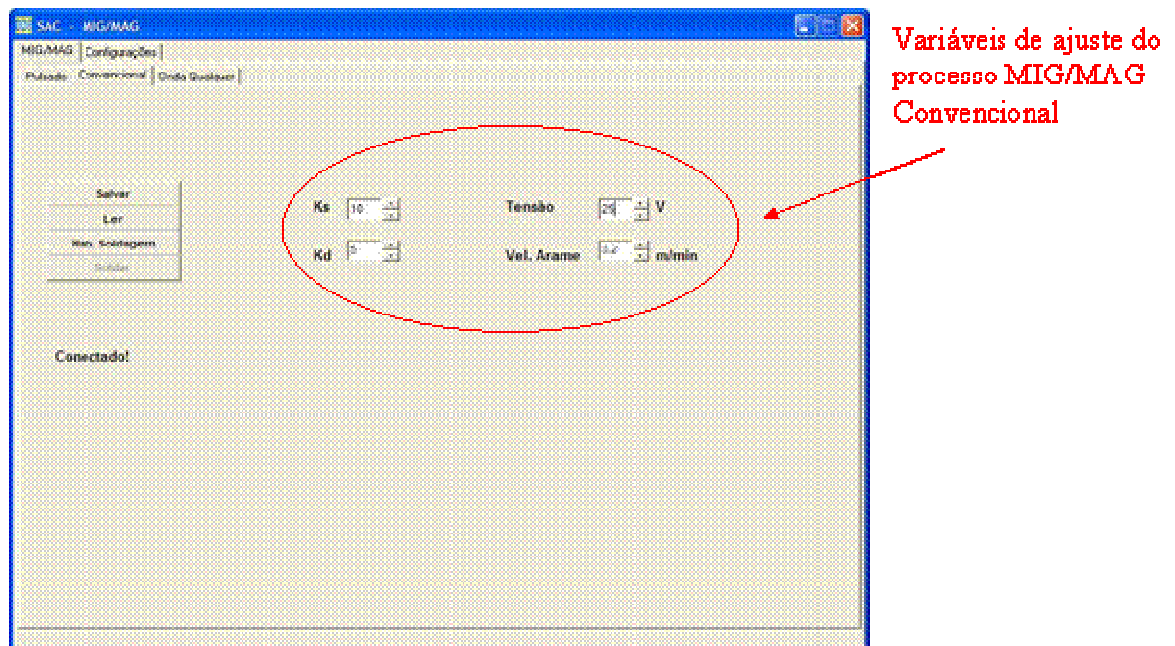


Figura 5.4 – Interface do processo *MIG/MAG Convencional*

As variáveis de ajuste do processo são a *tensão de referencia* (U_{ref}) e a *velocidade de alimentação de arame-eletrodo* (V_a). Existe também a possibilidade, como se observa na Figura 5.4, de variação das indutâncias de subida (K_s) e descida (K_d) da corrente de soldagem durante o processo. Essas indutâncias permitem uma suavização da forma de onda de corrente, propiciando, entre outras características, a redução da quantidade de respingos durante o processo.

5.1.1.4 MIG/MAG Forma de Onda qualquer

O processo MIG/MAG forma de onda qualquer, como visto no capítulo 3, tem a propriedade de permitir ao usuário desenhar numa área de gráfico a forma de onda desejada para a corrente de soldagem durante o regime permanente do processo, Figura 5.5. Está disponível também nesta interface o ajuste da velocidade de alimentação de arame-eletrodo.

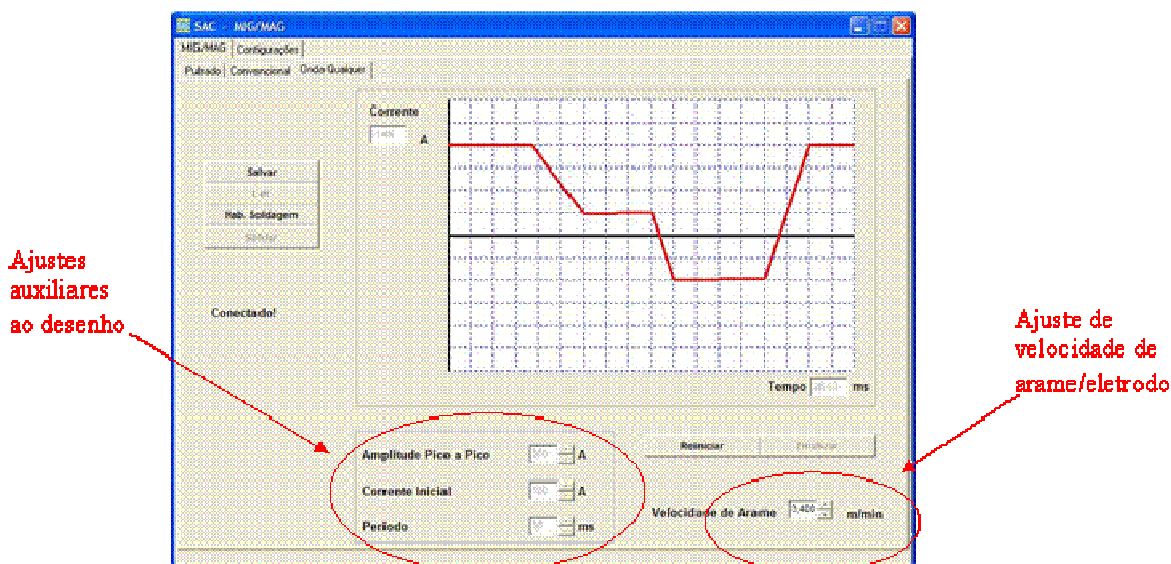


Figura 5.5 – Interface do processo MIG/MAG Onda Qualquer

Quando habilitada a soldagem e após o disparo de início do processo, o SAC impõe à fonte de soldagem as condições de corrente pré-estabelecidas pelo desenho, porém, obviamente não se responsabiliza pela execução correta do cordão de solda. As condições de estabilidade da modalidade MIG/MAG estão bastante ligadas à forma de onda de soldagem, fazendo com que alterações significativas nesta característica do processo, acarretem comportamentos diferenciados do arco voltaico.

Esta ferramenta vem sendo utilizada com crescente frequência dentro do LABSOLDA e já se observa um potencial significativo nos estudos de soldagem em geral, principalmente no tocante à análise do comportamento dos processos perante a imposição de formas de onda não convencionais.

Como aplicação imediata desta ferramenta está se realizando estudos voltados à soldagem *MIG/MAG CA* para a recuperação de dutos em operação, projeto financiado pela Petrobrás com término previsto para final de 2007. Nestes estudos se faz análises sobre estabilidade, penetração entre outras características do processo por meio da variação das formas de onda do processo de soldagem. A Figura 5.6 ilustra uma das formas de onda propostas para o projeto, com seu respectivo oscilograma e cordão de solda resultante comparado à um cordão executado em corrente contínua.

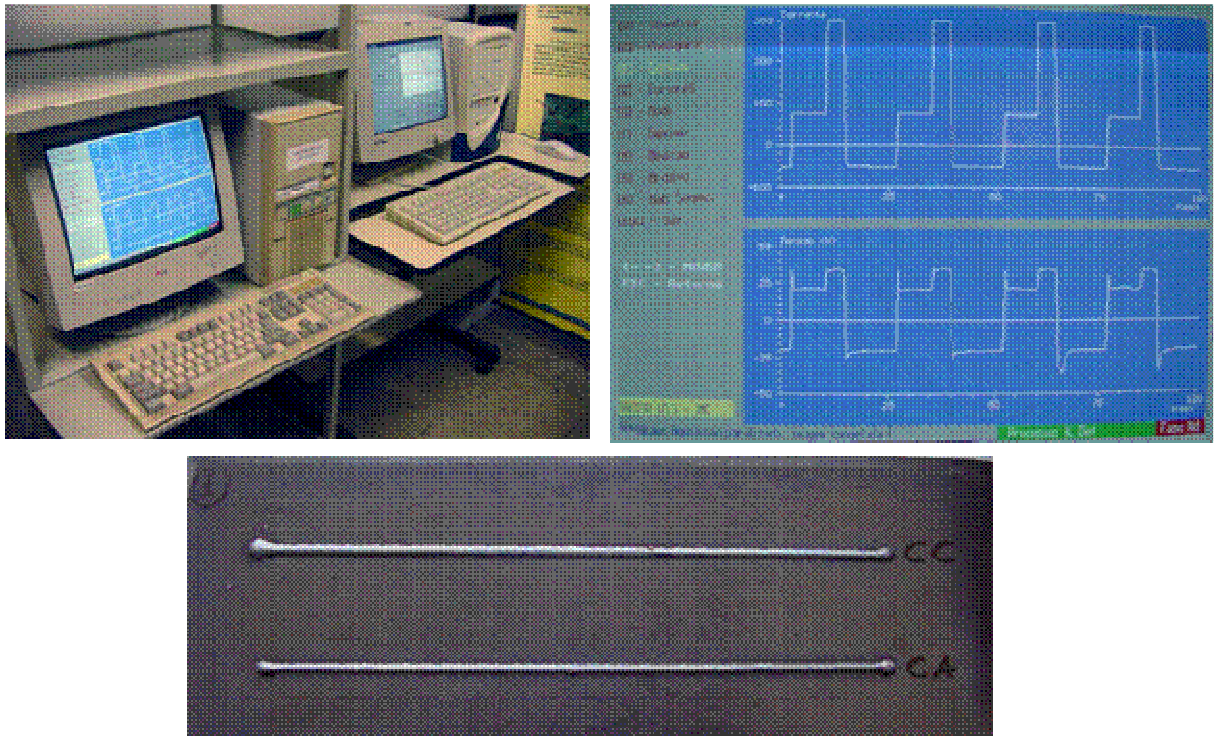


Figura 5.6 – Aplicação da interface *MIG/MAG Onda Qualquer*

5.1.2 Interface do processo CCC no SAC

O processo CCC apresenta características diferenciadas de uma soldagem MIG/MAG tradicional, tanto em função de seu campo de aplicação quanto relacionado às suas lógicas de controle. Apesar de funcionar como parte integrante do Sistema Avançado de Controle, em um primeiro momento o CCC foi implementado em uma interface MS-Windows separada, haja vista as dificuldades encontradas na uniformização de suas variáveis e possíveis exibições gráficas com os demais processos. A interface criada para o processo CCC é exibida na Figura 5.7 e apresenta funcionamento similar ao software *Digi2000*, Figura 2.11. No entanto, com a flexibilidade de uma plataforma de fácil operação como é o MS-Windows.

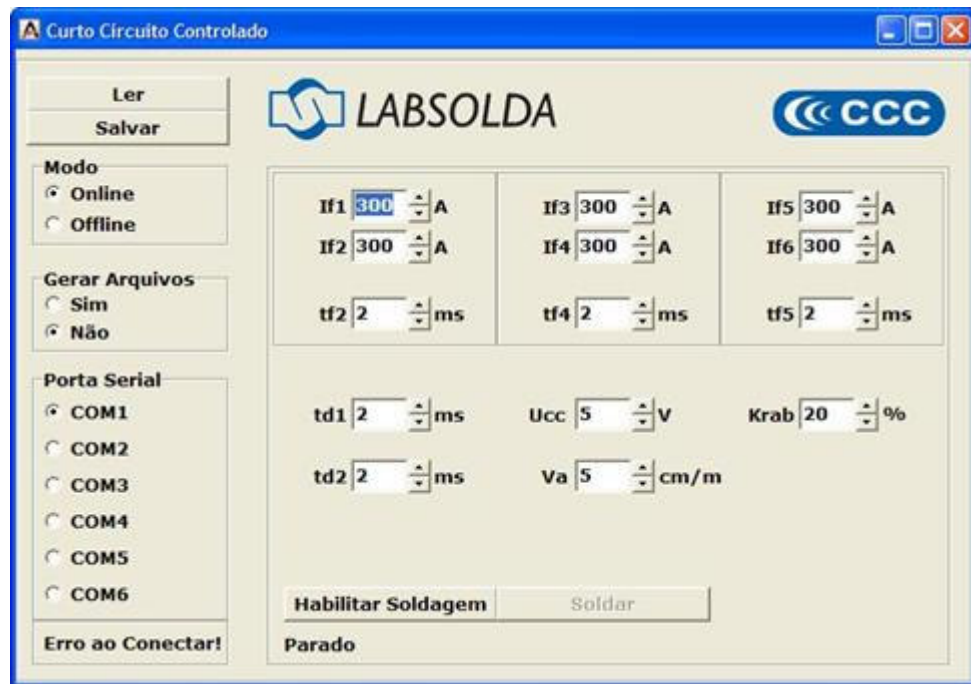


Figura 5.7 – Interface do processo CCC no SAC

A quantidade excessiva de variáveis disponibilizadas para a manipulação do operador se deve a fase de pesquisa e exploração que esta modalidade ainda se encontra no LABSOLDA, colaborando, dessa maneira, com a demora em se absorver este processo na plataforma multidisciplinar do SAC. Estudos, similares aos executados na dissertação de mestrado do Eng. Régis Gonçalves Dias [7], ainda devem ser realizados para se obter um procedimento científico para determinação de parâmetros do CCC de forma sinérgica para uma quantidade significativa de aplicações, assim como no processo MIG/MAG Pulsado, para que se possa disponibilizar ao usuário do SAC uma ferramenta capaz de executar a modalidade em questão sem tantos conhecimentos prévios da tecnologia da soldagem.

5.2 Características Especiais do SAC

O SAC, sendo uma ferramenta altamente adaptativa a cada aplicação em que se deseja utilizá-lo, proporciona nas bancadas de ensaios características únicas, porém, sempre baseada em uma plataforma padrão.

Algumas adaptações foram realizadas ao longo, da ainda curta, história de existência do SAC para proporcionar estudos mais específicos sobre determinados aspectos dos processos de soldagem a arco.

5.2.1 Geração indireta de formas de onda especiais

O desenho de formas de onda não convencionais à mão livre, ou seja, com a utilização do *mouse*, por muitas vezes pode se tornar penoso, principalmente quando pequenas e sucessivas alterações de desenho desejam ser realizadas. Nos estudos voltados à condição de estabilidade da soldagem *TIG CA*, por exemplo, o foco dos principais estudos que vêm sendo realizados está voltado a taxa de transição da corrente, em outras palavras, a velocidade com que a corrente de soldagem passa por zero. Neste sentido desenvolveu-se uma versão do SAC, batizada de *SAC Turbo*, para que uma das variáveis de entrada do desenho fosse exatamente a taxa de transição da corrente, ficando com o software a função de execução do desenho, sem a intervenção direta do usuário, Figura 5.8.

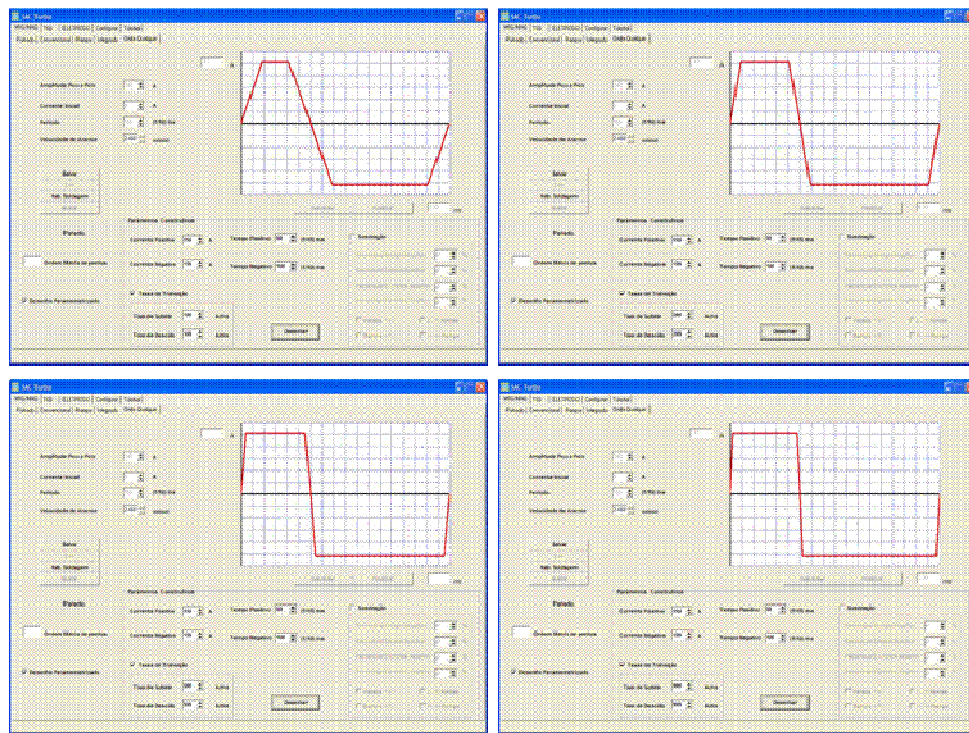


Figura 5.8 – Formas de onda geradas pelo SAC Turbo

Outra intervenção permitida nesta versão do SAC é a possibilidade de realização de estudos sobre a suavização de ruídos durante a soldagem, que na modalidade TIG CA se apresenta de forma bastante proeminente. A Figura 5.9 ilustra a suavização das formas de onda com o fim de redução dos ruídos durante a soldagem.

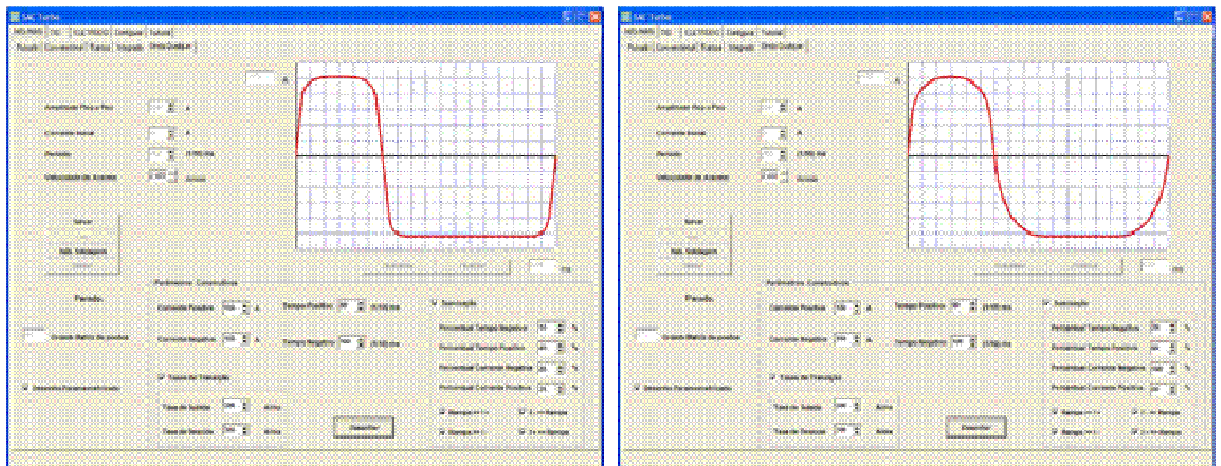


Figura 5.9 – Formas de onda suavizadas geradas pelo *SAC Turbo*

5.2.2 Interface do SAC para o novo método de abertura de arco

Para o desenvolvimento do procedimento de abertura suave do arco desenvolveu-se um software que, além de garantir a eficácia do procedimento proposto, também deveria ter características simples de navegação e alteração dos parâmetros de abertura do processo. Para tanto, estruturou-se as lógicas de controle, no software *SACOSCR*, para que no cabeçalho da classe de comando do processo houvesse a possibilidade de entrada dos parâmetros de abertura, como se observa na Figura 5.10.

```

{ **** }
{ **** }
{ **** Abertura de arco suave **** }
{ **** }
{ **** }

{PARAMETROS DE ENTRADA}

VA_APROXIMACAO      = 100;
VA_RETORNO          = 100;
CORRENTE_POS_TOQUE  = 20;
TEMPO_PRE_PULSADO   = 500;
CORRENTE_PRE_PULSADO = 50;

{PARAMETROS DO PROGRAMA}

TENSÃO_CURTO_CIRCUITO = 50; {tensão de referencia para identificacao de curto circuito}
TENSÃO_EXTINÇÃO       = 400; {tensão de referencia para identificacao de extinção de arco}
TENSÃO_ARCO_ABERTO    = 100; {tensão de referencia para identificacao de arco aberto}
TENSÃO_ABERTURA       = 170; {tensão acima da qual o processo entra em regime apos rotina de
abertura}
TEMPO_CURTO_CIRCUITO  = 10; {tempo necessario para a confirmacao de curto circuito}
TEMPO_EXTINÇÃO        = 50; {tempo necessario para a confirmacao de extinção do arco}
TEMPO_AQUECIMENTO     = 0;  {tempo de aquecimento antes do retorno do arame}
CORRENTE_PRE_TOQUE     = 10; {Corrente imposta pela fonte antes de abrir o arco}
CORRENTE_ARCO_ABERTO  = 5;  {Corrente de referencia para a verificacao de existencia
de arco durante o retorno do arame}

{ **** }
{ **** }
{ **** }
{ **** }
{ **** }

```

Figura 5.10 – Cabeçalho de controle de abertura do SACOSCR

Observa-se que existem dois conjuntos de parâmetros para o procedimento de abertura suave do arco: *parâmetros de entrada* e *parâmetros do programa*. Os *parâmetros de entrada* correspondem as variações provocadas pelo pesquisador para promover a abertura suave do arco da forma que julgar ser a mais adequada. No entanto, para o perfeito funcionamento do procedimento proposto, algumas referências devem ser tomadas, conforme comentado no capítulo 0, para que as

lógicas de controle possam agir de forma sincronizada e coerente. Estas referências são encontradas no conjunto de variáveis denominado “parâmetros do programa”.

O acesso fácil às variáveis, por meio do cabeçalho da classe de comando, atribui uma significativa velocidade no levantamento dos parâmetros do procedimento de abertura para os diferentes materiais que se deseja soldar. A necessidade de baterias de ensaios para tal levantamento é evidente, haja vista as propriedades físicas variadas encontradas nos diferentes metais, o que faz a operacionalidade facilitada do SAC uma ferramenta fundamental para agilidade na pesquisa.

5.2.3 Interface do SAC para o controle de comprimento de arco

As lógicas de controle de comprimento de arco, utilizadas no desenvolvimento das novas técnicas de estabilização do processo MIG/MAG, capítulo 4, foram implementadas, assim como as do procedimento de abertura, de forma estruturada e capazes de viabilizar a fácil intervenção por parte do pesquisador no funcionamento dos controladores do processo.

No caso do controle de altura de arco, os ajustes sobre o funcionamento do modelo proposto, são executados sobre as constantes do controlador PID (K_p , K_i , K_d1 e k_d2), Equação 4.4. Estes ajustes proporcionam variações nas respostas dos controladores e conseqüentemente no comportamento do arco voltaico.

Entretanto, diferentemente dos parâmetros de ajuste do procedimento de abertura suave do arco, as constantes do controlador PID utilizado podem ser alteradas em tempo real, ou seja, disponibilizou-se na interface com o usuário do

SACOSCR um menu de ajustes destas constantes, Figura 5.11, para que se possa, durante o cordão de solda variar o comportamento dos controladores.



Figura 5.11 – Interface com o usuário do SACOSCR

A necessidade para tais manipulações em tempo real vem da possibilidade de se obter uma sensibilidade maior sobre o comportamento do processo de soldagem mediante ajuste de cada constante individualmente, sem a necessidade de interrupção do cordão. O fato de não se ter um modelo preciso do arco voltaico, gera problemas significativos na determinação das constantes dos controladores, e obter um sentimento sobre a influência das variações provocadas sobre as condições de estabilidade do arco se torna extremamente necessário para o sucesso em ensaios preliminares.

Além disso, este tipo de intervenção, em tempo real, nos controladores viabiliza o ajuste dos mesmos para condições de soldagem que se reproduzem somente após algum tempo de cordão, como o comportamento do arco após o aquecimento do metal de base, por exemplo.

5.3 Resultados das novas técnicas de estabilização de arco

Na atual concepção dada pelo Sistema Avançado de Controle pode-se considerar concluída neste trabalho todo o suporte aos estudos relacionados às novas técnicas de estabilização do processo MIG/MAG, consolidando uma interface de controle com o operador e também permitindo os ajustes, tanto dos parâmetros de abertura de arco, quanto dos controladores empregados no sistema de manutenção de comprimento do mesmo.

Os resultados aqui apresentados correspondem a análises preliminares dos ensaios promovidos para o procedimento de abertura de arco e seu controle de altura. Neste primeiro momento, os referidos ensaios tiveram como principal objetivo avaliar as funcionalidades das ferramentas recém concebidas na plataforma de controle, no entanto, já é possível vislumbrar as potencialidades que as novas técnicas de estabilização trazem ao processo MIG/MAG.

5.3.1 Resultados do novo método de abertura de arco

Realizou-se ensaios de abertura de arco sobre chapas de alumínio de 2 mm de espessura variando-se os parâmetros do procedimento para se obter as condições de melhor funcionamento desta nova ferramenta do SAC.

Os ensaios programados buscaram dimensionar os parâmetros de estabilização do procedimento de abertura de arco, ou seja, *tempo de estabilização* (Testab), *corrente de estabilização* (Iestab) e *velocidade de arame de retorno* (Varet). Trabalhou-se também com a possibilidade de variação da geometria da

ponta do arame-eletrodo no momento da ignição do arco. Sabe-se que, principalmente em sistemas automatizados, as condições da ponta do arame-eletrodo no momento abertura não são favoráveis ao início suave do processo, já que, devido ao anterior regime permanente que o sistema estava submetido, a ponta do mesmo encontra-se arredondada, o que, em casos de abertura com elevados aportes térmicos, *hot start*, geram diferenças significativas no comportamento inicial do arco, quando comparado à aberturas realizadas com a ponta cortada do arame[8].

O critério de comparação utilizado nos experimentos é a *tensão inicial de regime permanente* ($U_{inicial}$), ou seja, a tensão imediatamente após a finalização do período de estabilização. Este valor apresenta-se como um indicativo do comprimento do arco nos primeiros instantes do regime permanente.

Os experimentos propostos com a variação dos parâmetros de estabilização e também da geometria da ponta do arame-eletrodo juntamente com os resultados obtidos para a tensão inicial de regime permanente são ilustrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tabela de experimentos para o procedimento de abertura

Experimento	I _{estab} (A)	T _{estab} (ms)	V _{aret} (m/min)	G _{ponta}	U _{inicial} (V)
C5510	50	50	1	0	17,9
C5511	50	50	1	1	19,3
C5520	50	50	2	0	19,5
C5521	50	50	2	1	19,5
C1510	100	50	1	0	19
C1511	100	50	1	1	20,3
C1520	100	50	2	0	21,5
C1521	100	50	2	1	21,8
C5110	50	100	1	0	19,3
C5111	50	100	1	1	21,3
C5120	50	100	2	0	22
C5121	50	100	2	1	21,8
C1110	100	100	1	0	21,8
C1111	100	100	1	1	24
C1120	100	100	2	0	22,8
C1121	100	100	2	1	23,8

5.3.1.1 Análise do novo método de abertura de arco

Os oscilogramas de corrente e tensão obtidos para os ensaios de abertura, Figura 5.12, mostram que apesar da sensibilidade de *U_{inicial}* à variação dos parâmetros do procedimento em questão, o mesmo apresentou uma excelente estabilidade para qualquer dos parâmetros ensaiados.

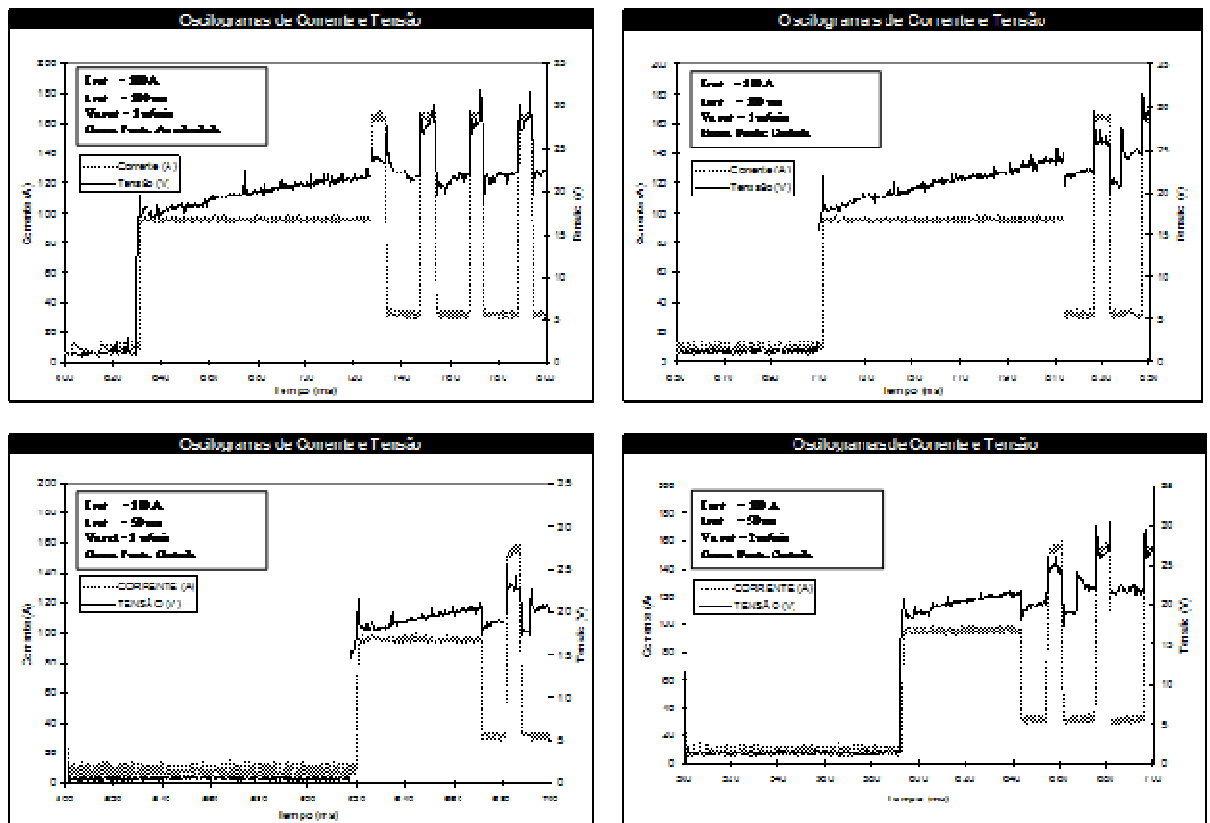


Figura 5.12 – Oscilogramas obtidos nos ensaios de abertura de arco

Devido à imparcialidade operacional do procedimento de abertura perante a variação dos seus parâmetros, a escolha do conjunto de variáveis fica a critério, obviamente, da tensão inicial de regime, $U_{inicial}$, e da energia empregada no momento da ignição do arco. Dessa maneira, na busca pela redução do aporte térmico do procedimento, optou-se pelas configurações com menores níveis de corrente aliada a pequenos intervalos de tempo de estabilização, com o compromisso, é claro, de um comprimento de arco inicial para o processo, satisfatório às condições de regime permanente.

A configuração que se utiliza de menores níveis de energia são as dos experimentos *C5510* e *C5511* (Tabela 5.1), cujos oscilogramas são ilustrados na Figura 5.13. Como se observa, mesmo se utilizando de pequenos aportes térmicos,

o procedimento de abertura proporcionou uma ignição de arco satisfatória e com um comprimento inicial de arco condizente com as alturas alcançadas em regime.

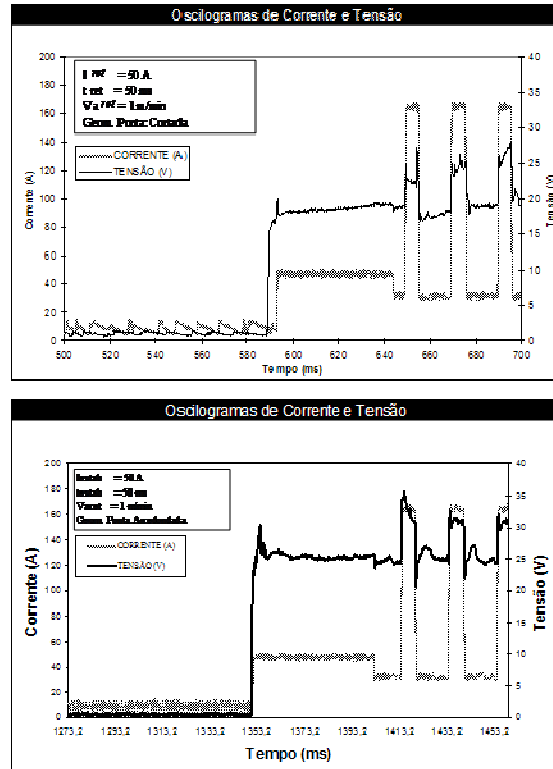


Figura 5.13 - Oscilogramas dos ensaios C5510 e C5511

5.3.2 Resultados do método de controle de comprimento de arco

Realizou-se ensaios exploratórios, também em chapas de alumínio de 2 mm, sobre os novos métodos de controle de altura de arco com intuito de efetuar uma análise sobre as respostas dos controladores PID perante a atuação sobre o arco voltaico.

Como já mencionado em seções anteriores, a dificuldade encontrada na determinação dos coeficientes dos controladores advém do desconhecimento que se tem sobre uma modelagem bem definida do arco voltaico. Dessa maneira, buscou-se em procedimentos empíricos, determinar um conjunto de constantes que

fizessem com que o comprimento do arco voltaico atingisse uma estabilidade satisfatória.

O procedimento utilizado é derivado do método de *ZIEGLER - NICHOLS* [12,13], amplamente empregado na indústria, onde frequentemente este tipo de problema é diagnosticado. O método consiste em variar as constantes dos controladores PID em uma seqüência, e de formas pré-determinadas, buscando alcançar a estabilidade do processo ajustando uma à uma das constantes de controle.

Considerando que as constantes a serem obtidas são K_p , K_i , K_{d1} e K_{d2} o método aplicado é descrito passo a passo a seguir:

- i Zera-se K_i , K_{d1} e K_{d2} e ajusta-se K_p para a melhor condição de estabilidade possível “ K_x ”. (encontra-se $K_p = K_x/2$);
- ii Ajusta-se K_p e varia-se K_i até a obtenção da estabilidade (encontra-se K_i);
- iii Mantêm-se K_p , zera-se K_i , e ajusta-se $K_{d1} = 1$, varia-se K_{d2} até obter a estabilidade (encontra-se K_{d2});
- iv Finaliza-se impondo os valores encontrados de K_p , K_i e K_{d2} simultaneamente e varia-se K_{d1} até a estabilidade (encontra-se K_{d1}).

Os resultados obtidos para cada um dos controladores utilizados para o controle de comprimento de arco são exibidos na Tabela 5.2

Tabela 5.2 - Constantes obtidas para os controladores PID

Modo de realimentação	Constantes do controlador PID			
	Kp	Ki	Kd1	Kd2
Tempo de Base	2	1	0,5	3
Corrente de base	2	2,2	1	4
Velocidade de arame-eletrodo	0,1	0	0,5	5

5.3.2.1 Análise do método de controle de comprimento de arco

A partir dos parâmetros ajustados conduziram-se alguns ensaios para verificar a eficácia do método de determinação de coeficiente dos controladores. Dessa maneira, se chegou a algumas conclusões, ainda subjetivas, porém, já bastante úteis neste primeiro momento, que é a observação do comportamento das lógicas de controle durante a execução do cordão de solda.

Nesta primeira análise observaram-se as particularidades no comportamento do sistema de controle em cada modo de realimentação. A realimentação utilizando a corrente de base (Ib), ilustrada na Figura 5.14, apresenta características bastante estáveis, em uma primeira análise. No entanto, facilmente submete o processo à condições problemáticas de manutenção de arco, devido a freqüente imposição de correntes de base relativamente baixas.

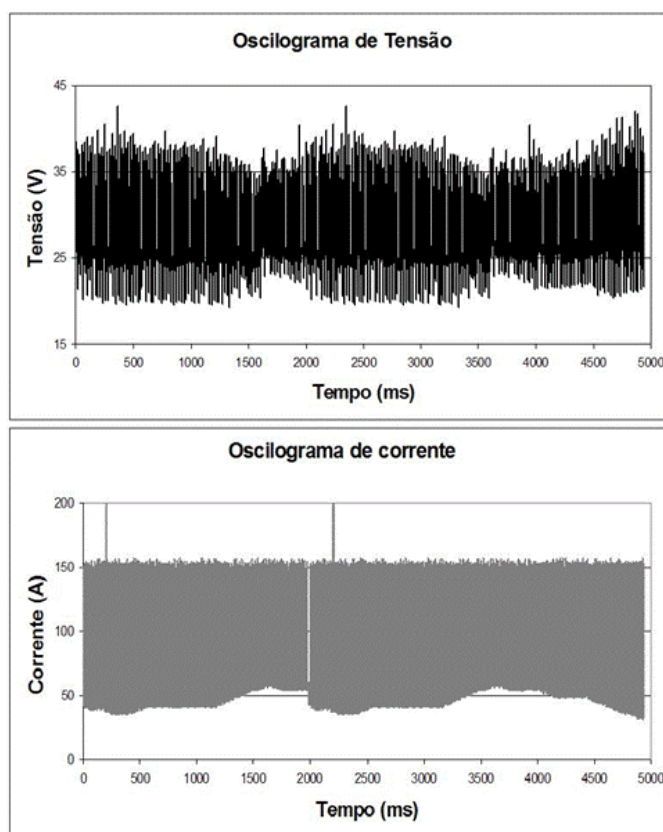


Figura 5.14 – Oscilogramas da realimentação pela corrente de base

A realimentação utilizando-se o tempo de base (t_b), conforme Figura 5.15, é a que apresenta tempos de resposta mais reduzidos, no entanto o processo fica constantemente executando pequenas correções de altura de arco, o que traz um significativo desconforto ao operador.

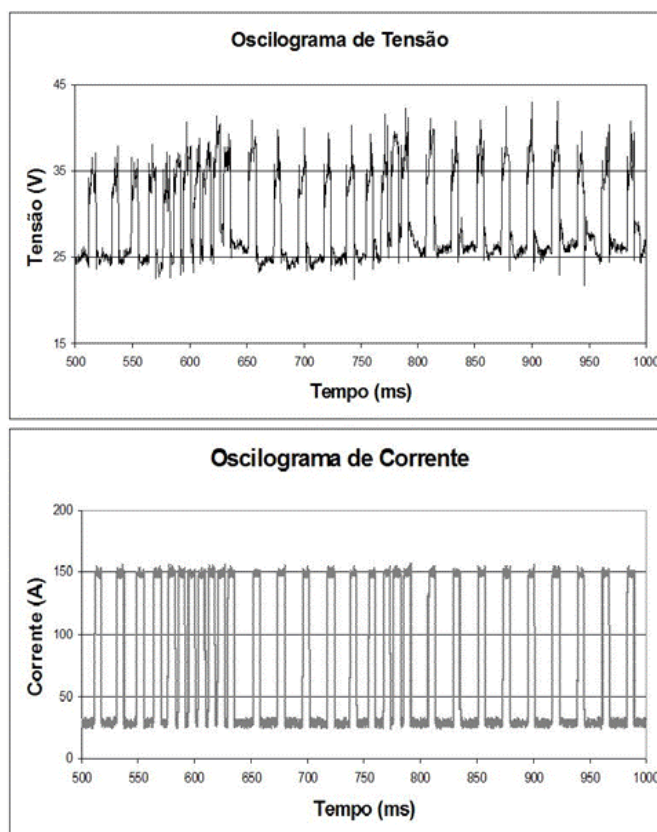


Figura 5.15 – Oscilogramas da realimentação pelo tempo de base

A utilização da velocidade de arame-eletrodo (V_a) como esforço de controle até certo ponto surpreendeu as expectativas com relação a manutenção do comprimento do arco. Neste modo de realimentação, poucas correções são observadas em torno do ponto de equilíbrio do arco voltaico, haja vista a já citada influencia dos tracionadores de arame. No entanto, quando o processo é submetido a variações abruptas de distância de contato bico-peça, o sistema não é capaz de responder satisfatoriamente, proporcionando subseqüentes curto-circuitos e extinções de arco, o que não foi observado nos outros modos de realimentação.

Conclui-se por meio destas breves análises que uma solução para a problemática da estabilidade do arco na modalidade MIG/MAG pode ser encontrada em concepções híbridas de controle, ou seja, simultaneamente realizar

realimentações diferenciadas no processo, se aproveitando das condições positivas de comportamento que cada um dos modos de realimentação apresenta.

A partir deste momento, com o Sistema Avançado de Controle em perfeito funcionamento, é preciso realizar ensaios sistemáticos para que se possam confirmar as hipóteses levantadas neste trabalho, e revelar novos pontos de vista sobre o comportamento do processo que não foram alvos deste estudo.

CAPITULO 6

CONCLUSÕES

O objetivos propostos no primeiro capítulo deste trabalho foram satisfatoriamente atingidos, como atesta o capítulo 5, destacando-se os seguintes itens:

6.1 Consolidação da plataforma de Controle e Aquisição

O Sistema Avançado de Controle foi consolidado como uma plataforma de pesquisa dentro do LABSOLDA. Atualmente se encontra em plena utilização por diferentes linhas de desenvolvimento do laboratório, sendo ferramenta fundamental de apoio a estudos acadêmicos e tecnológicos. Os avanços alcançados pelo SAC permitem que se explore de forma mais contundente as propriedades de cada processo de soldagem, permitindo alterações em suas lógicas de controle e princípios básicos de funcionamento. As possibilidades de inovações tecnológicas geradas pelo SAC são inúmeras, principalmente no que diz respeito ao estudo de diferentes formatos de onda de corrente de soldagem para cada processo. A versatilidade do sistema, adaptando-se à praticamente todos os processos de soldagem, torna o SAC uma ferramenta universal para pesquisa científica, tendo um futuro bastante promissor dentro de instituições de ensino e tecnológicas.

6.2 Infra-estrutura para pesquisas sobre a abertura suave do arco

As pesquisas relacionadas à abertura suave do arco voltaico na soldagem MIG/MAG estão em andamento com a infra-estrutura, implementada no Sistema Avançado de Controle, totalmente concluída. O levantamento de parâmetros para a

abertura de arco suave para a soldagem de alumínio foi finalizado neste trabalho, no entanto, a plataforma montada para tal levantamento, assim como já mencionado no transcorrer desta dissertação, pode ser utilizada para qualquer outro material, já que permite ajustes em todas as variáveis do procedimento proposto. A suavização da abertura do arco voltaico na soldagem MIG/MAG pode ser considerada como parte integrante de uma linha de pesquisa maior do LABSOLDA, que é o desenvolvimento de um procedimento de soldagem altamente adaptado à aplicação em chapas finas.

6.3 Novos métodos de controle de comprimento de arco.

Os novos métodos de controle de comprimento de arco propostos nessa dissertação estão consolidados como objetos de pesquisa ainda. A partir deste momento o SAC está apto para dar o apoio necessário ao desenvolvimento mais apurado das novas técnicas de controle, bem como está pronto para a implementação de novas lógicas que se virem adequadas para os diferentes processos de soldagem. A ferramenta para o controle de comprimento do arco na soldagem MIG/MAG que se disponibilizou no SAC permite o ajuste em tempo real dos ganhos dos controladores, dessa maneira busca-se atingir uma maior eficiência na análise do comportamento dos controladores já implementados sobre o processo MIG/MAG.

6.4 Estudos relacionados à soldagem TIG CA

Com o término deste trabalho os estudos relacionados a soldagem TIG CA, no que diz respeito a sua estabilidade, e análise de formatos de onda mais adequados para minimização de ruídos, ganharam novo fôlego com a nova plataforma.

Atualmente pesquisas envolvendo o processo TIG CA estão utilizando o SAC como ferramenta principal de apoio, o que gera uma realimentação por parte dos usuários a respeito de necessidades ainda não implementadas no SAC. Assim como na utilização em outras linhas de pesquisa, os estudos do processo TIG CA, estão contribuindo significativamente para a evolução da plataforma de controle, propiciando a constante evolução do sistema.

6.5 Plataforma para o Processo Curto-Circuito Controlado

O formulário criado no SAC para os estudos do processo Curto-Circuito Controlado (CCC) está concluído e em plena utilização dentro do LABSOLDA. A ferramenta, que permite o ajuste em tempo real dos parâmetros do processo, encontra-se em uso pelos pesquisadores do laboratório no desenvolvimento de parâmetros e técnicas para a automatização da soldagem MIG/MAG de tubulações. A exploração do CCC é advinda da necessidade de um procedimento estável para o passe de raiz ao longo de todo o perímetro da tubulação, com intuito de se obter uma robustez aceitável em todas as posições de soldagem. Dessa maneira, a versatilidade do SAC incorpora ao desenvolvimento do procedimento praticidade e, acima de tudo, velocidade em se atingir resultados apreciáveis.

CAPITULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A padronização atribuída ao Sistema Avançado de Controle neste trabalho o coloca como uma das principais ferramentas de apoio à pesquisa, desenvolvimento e ensino da soldagem dentro no LABSOLDA. Sua concepção altamente versátil faz com que se ampliem os horizontes de muitas linhas de desenvolvimento do laboratório, criando perspectivas promissoras para o futuro da instituição.

Dentre as vertentes que se pode propor para o contínuo aperfeiçoamento do SAC e também para o aproveitamento do mesmo, como infra-estrutura básica, à pesquisa, pode-se citar:

- i Aprimoramento da interface com o usuário na plataforma MS-Windows do SAC (CPU1);
- ii Implementação das modalidades de soldagem que ainda faltam ser absorvidas pelo SAC;
- iii Evoluir a plataforma atual para uma concepção que utilize apenas um microcomputador;
- iv Estudos detalhados das novas técnicas de estabilização do arco voltaico no processo MIG/MAG por comando de corrente (abertura e controle de altura);
- v Realizar análises completas sobre as condições de estabilidade do processo TIG CA, quanto ao seu transitório de corrente;
- vi Dar prosseguimento aos estudos do processo CCC, agora com uma ferramenta mais versátil e didática, o SAC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUTRA, J.C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG**. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.
- [2] GOHR, R. J. **Projeto e realização de uma fonte de energia para soldagem multi-processo**. 1992. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [3] DIAZ, V.M.V. **Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição**. 2005. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [4] BÖHME, D. et al. Mig-Welding of very thin al-sheets by A.C. pulsed arc. **Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München**. Monique, n. XII 1720, mai, 2002.
- [5] HARWIG, D. D. et al. Melting Rate Analysis of the VP-GMAW Process. **Cooperative Research Program**. Ohio, dez, 2002.
- [6] SANTOS, T. F. dos, **Soldagem MIG-AC para chapas finas de alumínio**, 2004.. Qualificação de doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [7] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. 2005, 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

-
- [8] SANTOS, T. F. dos. **Estudo sobre a abertura e estabilidade dos arco MIG na soldagem de alumínio**. 2000. 68 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [9] LUCAS, W; AHMED N; HUTT, G.A. Process stability in MIG welding. **The welding Institute Research Bulletin**. USA, v.24, p. 329-336, out, 1983.
- [10] ESSERS, W.G. 65th American Welding Society Annual Meeting and 15th International AWS-WRC Brazing and Soldering, 1984, Dallas-USA. **Arc Control with Pulsed GMA Welding**. Dallas: AWS, 1984, p. 21.
- [11] RICO, J. E. N. Introdução à Análise e Projeto de Sistemas e Controle Lineares, 2005. Disponível em
<http://www.das.ufsc.br/disciplinas/das5121/uploads/nota_aula/ap_real_parte1.pdf>
Acesso em 30 mar 2007
- [12] CO, T. B. Ziegler-Nichols Method. **Chemical Engineering** Michigan, 2007. Disponível em: <<http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/zn.html>>. Acesso em: 20 fev 2007.
- [13] FIGUEIREDO, L. C. Regras para determinação dos parâmetros de controladores de PID. **UnilesteMG**. Minas Gerais, 2004. Disponível em: <http://professores.unilestemg.br/~figueiredo/guia_cm1.pdf>. Acesso em 29 mar 2007.
- [14] DEITEL, H. M., DEITEL, P.J. **C++ Como Programar**. 3ª Edição, Editora Bookman, 2005.

-
- [15] RUMBAUGH, J., BLAHA, M., PREMERLANI, W., EDDY, F., LORENSEN, W.
Modelagem e Projetos Baseados em Objetos . 8ª Edição. Editora Campus, 1994.